

FAU Studien aus dem Maschinenbau 354

## **Tobias Gläßel**

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe



Tobias Gläßel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe

# FAU Studien aus dem Maschinenbau

## Band 354

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack Tobias Gläßel

# Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen FAU University Press 2020 Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Bitte zitieren als

Gläßel, Tobias. 2020. Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 354. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-357-1.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home

Verlag und Auslieferung: FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-356-4 (Druckausgabe) eISBN: 978-3-96147-357-1 (Online-Ausgabe) ISSN: 2625-9974 DOI: 10.25593/978-3-96147-357-1

## Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe

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

zur Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Tobias Gläßel, M.Sc.

aus Hof

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

Tag der mündlichen	
Prüfung:	22.07.2020
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof Dr -Ing habil Andreas Paul Fröba
	i ingi masin i marcus i au i robu
Gutachter:	Prof. DrIng. Jörg Franke Prof. DrIng. Peter Hoffmann

### Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Der erste Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für die tatkräftige Unterstützung meiner Forschungsarbeit sowie die geleistete Hilfestellung im Promotionsverfahren. Darüber hinaus förderte er meine persönliche und fachliche Weiterentwicklung durch die Übertragung herausfordernder Aufgaben, in welchem Kontext ich mich insbesondere für die gewährte Selbstständigkeit und das entgegengebrachte Vertrauen bedanke.

Als weiteren Unterstützer im Promotionsverfahren danke ich Prof. Dr.-Ing. Peter Hoffmann für die Übernahme des Korreferats und die anregenden fachlichen Diskussionen meiner Forschungsergebnisse. Darüber hinaus gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. habil. Kai Willner sowie Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß für die Begleitung der Promotionsprüfung als Vorsitzender der Prüfungskommission bzw. als weiteres prüfungsberechtigtes Mitglied.

Außerdem bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls FAPS, wobei der Forschungsbereich Elektromaschinenbau besonders hervorzuheben ist. So hat dessen kollegiale Atmosphäre, der rege wissenschaftliche Erfahrungsaustausch und die stete Unterstützung mein Vorankommen maßgeblich erleichtert.

Auch meinen Forschungspartnern und Studenten danke ich für ihr Engagement, das zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern Rosemarie und Jürgen für den stets gewährten Rückhalt sowie die Ermöglichung meiner Ausbildung. Der größte Dank gilt meiner Frau Kathrin für die verständnisvolle Rücksichtnahme und Geduld, die sie mir während der Anfertigung dieser Ausarbeitung entgegengebracht hat, sowie die fortwährende Unterstützung beim Erreichen meiner Ziele.

Nürnberg, August 2020

Tobias Gläßel

## Inhaltsverzeichnis

For	melz	eichen- und Abkürzungsverzeichnisix		
1	Einleitung und Zielsetzung			
2 Kont Trak		taktierung im Kontext der Produktion elektrischer ktionsantriebe5		
	2.1	Weiterentwicklung elektrischer Antriebe durch automobile Anforderungen		
		<ul> <li>2.1.2 Anforderungen an Maschinen zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs</li></ul>		
	2.2	Wandel der Produktionstechnologien für die Herstellung von Statorwicklungen14		
		<ul> <li>2.2.1 Etablierte Technologien zur Wicklungsherstellung15</li> <li>2.2.2 Herstellung von Formspulenwicklungen</li></ul>		
	2.3	<ul> <li>Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen20</li> <li>2.3.1 Prozesstechnologien zum Fügen von Wicklungen21</li> <li>2.3.2 Abtrag der Isolationsschicht von Kupferleitern28</li> <li>2.3.3 Anwendungsszenarien und technologische Potenziale von Kontaktierungstechnologien</li></ul>		
	2.4	Kontaktierung von Wicklungen im Laserstrahlschweißverfahren		
		<ul> <li>2.4.1 Herausforderungen beim Schweißen von Kupfer mit Laserstrahlung</li></ul>		
	2.5	Ableitung des Forschungsbedarfs und Lösungsweg der Arbeit		

3 Kausalitäten beim Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen		ısalitäten beim Laserstrahlschweißen von mspulenwicklungen43
	3.1	Prozessketten zur serientauglichen Herstellung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen
	3.2	Wechselwirkungen laserbasierter Kontaktierungstechnologien entlang der Prozesskette49
	3.3	Ermittlung und Darstellung prozessübergreifender Abhängigkeiten
4	Abt For	rag der Isolation von Kupferlackdrähten für mspulenwicklungen55
	4.1	Quantifizierung von Lackrückständen mittels Fluoreszenzmessung
		<ul> <li>4.1.1 Messung der Fluoreszenz organischer Verbindungen 56</li> <li>4.1.2 Qualifizierung der Fluoreszenzmessung zur Erfassung von Lackrückständen</li></ul>
	4.2	Laserbasierter Abtrag des Isolationsmaterials von rechteckigen Kupferdrähten60
		<ul> <li>4.2.1 Experimenteller Vergleich laserbasierter Abtragsprozesse für rechteckigen Kupferlackdraht61</li> <li>4.2.2 Prozessbezogene Abhängigkeiten für infrarote Laser</li></ul>
	4.3	Benchmark mit alternativen Technologien und Fazit69
5	Pro For	zesseinflussgrößen beim Laserstrahlschweißen von mspulenwicklungen
	51	Thermische Wechselbeziehungen des Fügenrozesses
	J.1	<ul> <li>5.1.1 Numerische Bestimmung der Temperaturverteilung</li></ul>
	5.2	Prozessbezogene Einflussgrößen der laserbasierten Kontaktierung
		5.2.1 Abhängigkeit der Kontaktstelleneigenschaften von Prozessparametern
		<ul> <li>5.2.2 Auswirkung maschinengebundener Einflussgrößen 98</li> <li>5.2.3 Wirkbeziehungen zwischen Prozessergebnis und Werkstückbeschaffenheit</li></ul>

Liter	ratur	verzeichnis173		
10	Anl	159 nang159		
9	Sur	mmary and outlook153		
8	Zus	ammenfassung und Ausblick147		
	7.3	Zusammenfassung und Fazit prozesskettenübergreifender Abhängigkeiten144		
		7.2.2 Konzeption eines Systems zur prozesssicheren Kontaktierung von Formspulenwicklungen		
		7.2.1 Systematisierung prozesskettenübergreifender Wechselwirkungen		
	7.2	Integration des Kontaktierungsprozesses in die Prozesskette		
		<ul> <li>7.1.3 Streuende Oberflächeneigenschaften der Fügezone in Folge der Formspulenherstellung</li></ul>		
		Formspulen		
		7.1.1 Prozesskettenbedingte Positionsabweichungen der		
	7.1	Prozesskettenübergreifende Abhängigkeiten des laserbasierten Kontaktierungsprozesses127		
7	Pro For	zessketten zur laserbasierten Kontaktierung von mspulenwicklungen127		
	п	Laserstranischweisens von Formspulenwicklungen		
	6.3	Zusammenfassung von Potenzialen des		
	6.2	Technologischer und wirtschaftlicher Vergleich mit alternativen Fügeverfahren		
	6.1	Verifizierung des Referenzprozesses18		
6	Aus Füg	slegung und Benchmark des laserbasierten geprozesses		
	5.3	Zusammenfassung und Fazit der Prozessuntersuchungen112		
		5.2.5 Auswirkung des Einsatzes von Prozessgasen 111		
		5.2.4 Wechselwirkung der Positionierung der Formspulenenden		

# Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

#### Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
A <sub>B</sub>	mm <sup>2</sup>	Fläche Brennpunkt
a <sub>F</sub>	mm	Messabstand Fluoreszenzmessung
A <sub>K</sub>	mm <sup>2</sup>	Anbindungsquerschnitt
AL	mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche Leiter
a <sub>L</sub>	mm	Rasterabstand
a <sub>O</sub>	mm	Abstand von Leiteroberkante
Aö	mm	Amplitude örtliche Leistungsmodulation
aw	mm	Messabstand Widerstandsmessung
Az	%	Amplitude zeitliche Leistungsmodulation
b	-	Koeffizient Regressionsgerade
b <sub>B</sub>	-	Regressionskoeffizient nach Bartlett
b <sub>F</sub>	mm	Breite Einführfase
<b>b</b> <sub>L</sub>	mm	Leiterbreite
bs	mm	Geometriebreite
bw	mm	Schweißnahtbreite
C <sub>m</sub>	-	Maschinenfähigkeitsindex
C <sub>mk</sub>	-	minimaler Maschinenfähigkeitsindex
C <sub>p</sub>	-	Prozessfähigkeitsindex
C <sub>pk</sub>	-	minimaler Prozessfähigkeitsindex
Cth	J/gK	spezifische Wärmekapazität
do	μm	Strahltaillendurchmesser
dB	μm	Brennfleckdurchmesser
de	μm	Durchmesser einfallender Strahl Linse
E <sub>F, a</sub>	J	absorbierte Energie Fluoreszenz
E <sub>F, e</sub>	J	emittierte Energie Fluoreszenz
Es	J/mm	Streckenenergie
E <sub>S, P</sub>	J/mm	Streckenenergie gepulster Laser
f	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit
F <sub>B</sub>	Ν	Bruchkraft
$\mathbf{f}_{\mathrm{L}}$	mm	Brennweite Linse
$\mathbf{f}_{\ddot{o}}$	Hz	Frequenz örtliche Leistungsmodulation
$\mathbf{f}_{P}$	Hz	Pulsfrequenz

Fs	Ν	Schälkraft
F <sub>S, max</sub>	Ν	mechanisierte Schälfestigkeit
$f_z$	Hz	Frequenz zeitliche Leistungsmodulation
Н	kJ/kg	Enthalpie
h <sub>F</sub>	mm	Höhe Einführfase
hı	μm	Isolationsschichtstärke
$h_L$	mm	Leiterhöhe
h <sub>n</sub>	%	relative Häufigkeit
hs	μm	Schichtstärke
$I_F$	RFU	Fluoreszenzintensität
IL	$W/mm^2$	Intensität Laserstrahl im Fokus
I <sub>M</sub>	mA	Messstrom
k <sub>B</sub>	-	Gruppengröße Regression nach Bartlett
l <sub>A</sub>	mm	Länge Isolationsabtrag Leiter
$l_{L}$	mm	Länge Leiter
l <sub>L, W</sub>	mm	vom Werkzeug überdeckte Leiterlänge
$\mathbf{l}_{\mathrm{Lot}}$	mm	Länge Folienlot
$l_R$	μm	Länge Leistungsrampe Nahtende
ls	mm	Länge Schweißgeometrie
M <sup>2</sup>	-	Beugungsmaßzahl
m1	g	Probenmasse vor Schweißprozess
m <sub>2</sub>	g	Probenmasse nach Schweißprozess
Ν	-	Stichprobenumfang
n	-	Merkmal Prozess n
n <sub>A</sub>	-	Anzahl vorausgegangener Abtragsvorgänge
n <sub>B</sub>	-	Anzahl Wertepaare Regression nach Bartlett
n <sub>G</sub>	-	Anzahl Wiederholungen Schweißgeometrie
<b>P</b> F	mm	Fokuslage
P <sub>L</sub>	W	Laserleistung
P <sub>L, a</sub>	W	auftreffende Laserleistung
P <sub>L, e</sub>	W	eingekoppelte Laserleistung
P <sub>L, m</sub>	W	mittlere Leistung gepulster Laser
P <sub>L, m, max</sub>	W	maximale mittlere Leistung gepulster Laser
P <sub>L, m, z</sub>	W	mittlere Leistung Laser zeitliche Modulation
P <sub>L, max</sub>	W	maximale Leistung Dauerstrichlaser
P <sub>L, N</sub>	W	Leistung Nebenbahnen
P <sub>L, S</sub>	W	Pulsspitzenleistung
PР	bar	Druck Prozessgas

$P_{R, Z}$	%	Zielleistung Leistungsrampe Nahtende
ģ	$W/m^2$	Wärmestromdichte
$\dot{q}_{K}$	$W/m^2$	Wärmestromdichte Konvektion
$\dot{q}_{L}$	$W/m^2$	Wärmestromdichte Wärmeleitung
<b>İ</b> Laser	$W/m^2$	Wärmestromdichte Laserstrahlung
ģs	$W/m^2$	Wärmestromdichte Wärmestrahlung
r	-	Korrelationskoeffizient
R <sub>F</sub>	μΩ	Widerstand Fügezone
$R_{F, \ soll}$	μΩ	Sollwert Widerstand Fügezone
R <sub>K</sub>	μΩ	Kontaktwiderstand
R <sub>L</sub>	μΩ	Leiterwiderstand
r <sub>L</sub>	mm	Kantenradius Leiter
R <sub>rel</sub>	%	relativer Widerstand Fügezone
Ru	μΩ	Widerstand unbeeinflusster Leiter
Rz	μm	gemittelte Rauhtiefe
$\mathbf{S}_{\mathrm{F}}$	mm	Fügespalt
s <sub>N</sub>	mm	Versatz Nebenbahnen
$\mathbf{S}_{\mathrm{T}}$	mm	Schneidspalt Trennvorrichtung
t	S	Zeit
t <sub>c</sub>	min	Zeitintervall chemischer Lackabtrag
t <sub>F</sub>	mm	Tiefe Einführfase
t <sub>Fl</sub>	S	Bestrahlungsdauer Fluoreszenzmessung
tı	ms	Integrationszeitraum
tP	ns	Pulsdauer
t <sub>Pr</sub>	S	Prozessdauer
t <sub>w</sub>	mm	Einschweißtiefe
Tz	S	Periodendauer zeitliche Leistungsmodulation
U <sub>F</sub>	μV	Spannungsabfall Fügezone
U <sub>M</sub>	μV	gemessene Spannung
$U_u$	μV	Spannungsabfall unbeeinflusster Leiter
VG	mm/s	Geometriegeschwindigkeit
W	μm	Radius Laserstrahl
Wo	μm	Radius Strahltaille
$X_{0,135\%}$	-	0,135 %-Quantil
$X_{16\%}$	-	16 %-Quantil
$X_{99,865\%}$	-	99,865 %-Quantil
$X_{84\%}$	-	84 %-Quantil
X <sub>mid</sub>	-	Mittelpunkt der Verteilung

Z	-	Zählimpulse
$\mathbf{z}_{\mathrm{L}}$	mm	Abstand Leiteroberkante von Blechpaket
α	%	Absorptionsgrad
$\alpha_{\rm W}$	$W/m^2K$	Wärmeübergangskoeffizient
$\Delta_{\rm E}$	-	Streubreite Eingangsgröße
$\Delta H_m$	kJ/kg	Schmelzenthalpie
$\Delta H_{\rm v}$	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie
Δm	mg	Massendifferenz
$\Delta_{\rm N}$	-	Prozessstreubreite Normalverteilung
$\Delta_{\mathrm{P}}$	-	Prozessstreubreite bezogen auf beeinflusstes
		Merkmal
$\Delta_{\mathrm{T}}$	-	Toleranzbreite
ε	-	Emissionskoeffizient
ε <sub>N</sub>	%	Porosität Nahtauslauf
$\eta_{dyn}$	Ns/m <sup>2</sup>	dynamische Viskosität
Θ	0	Einfallswinkel
$\theta_{m}$	°C	Temperatur Schmelze
$\theta_{Mess}$	°C	Werkstücktemperatur während Messung
θο	°C	Temperatur Ofen
$\theta_{S}$	°C	Wärmeschocktemperatur
$\theta_U$	°C	Temperatur Umgebungsmedium
$\theta_{W}$	°C	Werkstücktemperatur
$ heta_{W,\ max}$	°C	maximal auftretende Werkstücktemperatur
λ	nm	Wellenlänge Strahlung
λ <sub>F, a</sub>	nm	absorbierte Wellenlänge Fluoreszenz
λ <sub>F, e</sub>	nm	emittierte Wellenlänge Fluoreszenz
$\lambda_P$	mm	Periodenabstand örtliche Leistungsmodulation
$\lambda_{th}$	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
ξ	-	prozesskettenbedingter Streuanteil
ρ	g/cm <sup>3</sup>	Dichte
$ ho_{el}$	$\Omega mm^2/m$	spezifischer Widerstand
σ	-	Standardabweichung
$\sigma_{B}$	$W/m^2K^4$	Stefan-Boltzmann-Konstante
φ(n)	-	Dichtefunktion Merkmalsstreuung Prozess n
$\phi(n_P)$	-	Dichtefunktion natürliche Streuung Prozess n
φ(x)	-	Dichtefunktion Merkmalsstreuung Prozess n-x
φ(y)	-	Dichtefunktion Merkmalsstreuung Prozess n-y
$\phi_{div}$	0	Divergenzwinkel

#### Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
Al	Aluminium
ASM	Asynchronmaschine
BEV	Battery Electric Vehicle (batterieelektrisches
	Fahrzeug)
CO2	Kohlenstoffdioxid
Cu	Cuprum (Kupfer)
Cu-ETP	Electrolytic Tough Pitch Copper (sauerstoffhaltiges
	Kupfer)
Cu-FRHC	Fire Refined Tough Pitch High Conductivity Copper
	(feuerveredeltes sauerstoffhaltiges Kupfer)
Cu-OF	Oxygen Free Copper (sauerstofffreies Kupfer)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle (Elektrofahrzeug)
FCHV	Fuel Cell Hybrid Vehicle (Brennstoffzellen-
	hybridfahrzeug)
FCV	Fuel Cell Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
FESM	fremderregte Synchronmaschine
FWHM	Full Width at Half Maximum (Halbwertsbreite)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hybridfahrzeug)
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of
	Radiation (Lichtverstärkung durch stimulierte
	Strahlungsemission)
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries
	(Organisation der erdölexportierenden Länder)
OSG	obere Spezifikationsgrenze
PAI	Polyamidimid
PEEK	Polyetheretherketon
PESI	Polyesterimid
PI	Polyimid
PKW	Personenkraftwagen
PMSM	permanentmagneterregte Synchronmaschine

permanentmagnetunterstütze Synchronreluktanz- maschine
Relative Fluorescence Unit (relative Fluoreszenz)
Repeatability and Reproducibility (Wiederhol- und Vergleichspräzision)
Supplier, Input, Process, Output, Customer
(Lieferant, Eingabe, Prozess, Ausgabe, Kunde)
Grundmode
United Nations Economic Commission for Europe (Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa)
untere Spezifikationsgrenze
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
Wolfram-Inertgas-Schweißen
Ytterbium dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Durch eine rasante Entwicklung im Bereich der elektrischen Antriebe und Akkumulatoren standen batterieelektrische Kraftfahrzeuge (BEV) bereits zum Ende des 19. Jahrhunderts vor einem Durchbruch, da diese den schwer zu startenden, lauten und Abgas emittierenden Fahrzeugen mit Benzinmotor als überlegen galten. So wurden im Jahr 1900 in den Vereinigten Staaten von Amerika 38 % aller produzierten Fahrzeuge mit einem elektrischen Antrieb ausgeliefert [1]. Erst die Erfindung des elektrifizierten Anlassers im Jahr 1912 leitete den Siegeszug des Verbrennungsmotors sowie die abnehmende Nutzerakzeptanz elektrisch betriebener Fahrzeuge ein. [2]

Die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs nimmt gegenwärtig an Fahrt auf, was auf ein zunehmendes Umweltbewusstsein und eine in Zukunft deutlich striktere Gesetzgebung bezüglich der zulässigen Abgasemissionen von Kraftfahrzeugen zurückzuführen ist. Dies macht sich insbesondere durch das stark wachsende Angebot an BEV und hybridelektrischen Fahrzeugen (HEV) bemerkbar. Eine 2018 vom Forum Elektromobilität im Verband des Deutschen Maschinen- und Anlagenbaus (VDMA) in Auftrag gegebene Studie kommt zu dem Ergebnis, dass im europäischen, US-amerikanischen sowie chinesischen Fahrzeugmarkt nur mit Verbrennungsmotor ausgestattete Kraftfahrzeuge (ICE) stark an Marktanteilen verlieren werden. Diese Prognose wird in Bild 1 zusammengefasst. [3]



Bild 1: Prognostizierte Marktanteile der Antriebsarten nach Regionen (Daten: [3])

Der Begriff Elektromobilität beschreibt allgemein den Transport von Personen oder Gütern mittels elektrisch betriebener Fahrzeuge und umfasst folglich z.B. auch Lastkraftwagen, Bahnen und Flugzeuge [4]. Aufgrund der dynamischen Entwicklungen und spezifischen Anforderungen im Bereich der elektrisch betriebenen Personenkraftwagen (PKW) beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf dieses Teilgebiet. Aktuell werden neben BEV auch alternative Konzepte zur Bereitstellung der elektrischen Energie für den Antrieb, wie HEV oder Brennstoffzellenfahrzeuge (FCV), vorangetrieben, um die eingeschränkte Reichweite batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge zu erhöhen [5]. Unabhängig von der Art der Bereitstellung der elektrischen Energie, haben alle Fahrzeuge mit elektrifizierten Antriebsstrang gemeinsam, dass die Energiewandlung zur Erzeugung einer mechanischen Antriebsleistung mit Hilfe eines elektrischen Motors realisiert wird.

#### Problemstellung

Für den Einsatz elektrischer Maschinen im Antriebsstrang müssen diese sowohl im Hinblick auf deren Auslegung als auch in der Herstellung neuen, automobilspezifischen Herausforderungen genügen. Um diesen begegnen zu können, wird zur Realisierung leistungsstarker Traktionsantriebe insbesondere die Wicklung, der Kernbestandteil eines elektrischen Antriebs, optimiert. Hierbei rückt die Formspulentechnologie in den Fokus, da mit dieser Art des Wicklungsaufbaus Vorteile einhergehen, welche die Grundlage für Antriebe mit einer hohen Leistungsdichte darstellen. [6]

Das wesentliche Merkmal von Formspulenwicklungen liegt darin, dass den Bereichen der Spulenköpfe und Spulenseiten, durch eine sequentielle Umformung, eine definierte Geometrie gegeben wird [7]. In einem darauffolgenden Setzverfahren werden die vorgeformten Spulen in den Magnetkörper des Stators eingesetzt und verbunden, um die Wicklung herzustellen. Bedingt durch die Vorgehensweise zeigt diese Technologie große Potenziale zur Realisierung stabiler Prozesse für die automatisierte Herstellung von Traktionsantrieben in der Großserie [8].

Obwohl rege Patentierungs- und Forschungstätigkeiten unter Beteiligung der Automobilindustrie auf ein großes Interesse hindeuten, befindet sich die Technologie der Formspulenwicklung in Bezug auf automobile Traktionsantriebe zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Dissertation noch in ihrer Hochlaufphase und stellt nicht den Stand der Technik dar. Als maßgebliche Herausforderung bei der Verwendung dieser Wicklungsart wird die hohe Anzahl an Kontaktstellen zur Herstellung einer mechanischen und elektrischen Verbindung zwischen den Leiterelementen identifiziert, an die hohe Qualitätsanforderungen gestellt werden [6]. Die Elemente bestehen aus dem Werkstoff Kupfer, der für Fügeoperationen eine Herausforderung darstellt, und weisen eine Isolationsschicht auf, die zusätzliche Problemstellungen mit sich bringt [9]. Gegenwärtig sind für diesen Prozessschritt keine etablierten und serientauglichen Kontaktierungstechnologien verfügbar.

#### Zielsetzung und Vorgehensweise

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel der vorliegenden Dissertation, den Prozess des Laserstrahlschweißens für die Kontaktierung von Formspulenwicklungen umfassend zu analysieren, um damit die Grundlage für eine großserientaugliche Herstellung leistungsdichter automobiler Traktionsantriebe zu schaffen. Hierbei erfolgt eine Fokussierung auf Formspulen, die aus lackisolierten Kupferleitern mit rechteckigen Leiterquerschnitten hergestellt werden.

Um die automobilspezifischen Rahmenbedingungen in den durchzuführenden Untersuchungen zu berücksichtigen, erfolgt zunächst eine Analyse von Formspulenwicklungen für den Einsatz in Kraftfahrzeugen und die Ableitung damit einhergehender Anforderungen an Prozesstechnologien zu deren Kontaktierung. Durch die Analyse der Herstellungsschritte und geeigneter Technologien erfolgt die Konzeption einer Prozesskette, mit deren Hilfe relevante Abhängigkeiten für die Kontaktierung abgeleitet werden.

Im Rahmen der Kontaktierung ist neben der Fügeoperation auch ein rückstandsfreier Abtrag des Isolationslacks im Bereich der Spulenenden durchzuführen. Daher erfolgt die Untersuchung geeigneter laserbasierter Prozesstechnologien, um eine reproduzierbare Vorbereitung des Fügebereichs zu ermöglichen. Für die abisolierten Leiter wird im Anschluss ein numerisches Modell aufgestellt, um die thermische Beeinflussung der Leiter durch den Schweißprozess beurteilen zu können. Durch Experimente wird die grundlegende Abhängigkeit der erzielbaren Kontaktstelleneigenschaften von den Prozessgrößen, der Beschaffenheit und Positionierung der zu verbindenden Leiter sowie anlagenbezogenen Einflussgrößen ermittelt.

Auf Grundlage der Kenntnis relevanter Einflussgrößen auf den laserbasierten Kontaktierungsprozess erfolgt eine detaillierte Analyse der Herstellungskette, um in vorgelagerten Fertigungsschritten entstehende, den Prozess beeinflussende, Abweichungen zu identifizieren. Die Erkenntnisse werden in ein Konzept überführt, das die Reduktion der auf diese Weise hervorgerufenen Streuungen des Kontaktierungsprozesses ermöglicht.

## 2 Kontaktierung im Kontext der Produktion elektrischer Traktionsantriebe

Die Elektromobilität entwickelt sich in Phasen, die dadurch gekennzeichnet sind, dass durch externe Faktoren eine gesteigerte Aufmerksamkeit erzeugt bzw. ein Innovationsschub ausgelöst wird. Nach diesem Modell befindet sich die Elektromobilität gegenwärtig in ihrer dritten Entwicklungsphase, wie aus Tabelle 1 hervorgeht. [10]

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Zeitraum	1851 - 1920	1992 - 2005	2010 - heute
Auslöser	Innovationen im Bereich elektrischer Antriebe und Akkumulatoren	Erwartung einer dritten Ölkrise in Folge des Golf- kriegs	gesetzliche Begrenzung der Emissionen und zu- nehmendes Umweltbe- wusstsein der Verbraucher
Meilensteine	Erfindung des Blei-Blei- Akkumulators und des Drehstrommotors	Aufnahme der Serienpro- duktion elektrisch betrie- bener Fahrzeuge (BEV, HEV)	starke Zunahme der Modellpalette und Zulas- sungszahlen elektrisch be- triebener Fahrzeuge (BEV, HEV, FCV)

Tabelle 1: Entwicklungsphasen der Elektromobilität (in Anlehnung an: [2; 10; 11; 12])

Durch die starke Zunahme der Modellpalette und Zulassungszahlen rückt aktuell die Produktion elektrischer Antriebe in Großserie in den Fokus von Industrie und Forschung. Dies wird auf zwei Faktoren zurückgeführt. So gewinnt die Herstellung elektrischer Traktionsantriebe seit Beginn der dritten Entwicklungsphase durch die Zunahme der Zulassungszahlen elektrischer Fahrzeuge um den Faktor 255 (2010: 8240; 2019: 2101680 [13]) stark an Relevanz. Dieser Bedeutungsgewinn wird durch die Notwendigkeit, Elektrofahrzeugen mittels deutlicher Kostensenkung eine weiter zunehmende Marktdurchdringung zu ermöglichen, untermauert. [14]

In diesem Kontext ist der Prozessschritt der Kontaktierung, in dem eine elektrische und mechanische Verbindung zwischen Leitern hergestellt wird, zu optimieren. Dies begründet sich vor allem darin, dass die Anzahl der je Elektromotor zu realisierenden Kontaktstellen durch den Einsatz der Technologie der Formspulenwicklung im Umfeld automobiler Traktionsantriebe stark ansteigt. Ein Vorteil dieser Art der Wicklungsherstellung liegt darin, dass komplexe und limitierte Wickelverfahren substituiert werden können [15]. Deswegen entwickelt sich die Kontaktierung zunehmend zu einem Kernprozessschritt bei der Herstellung von Erregerwicklungen elektrischer Antriebe. [P1]

#### 2.1 Weiterentwicklung elektrischer Antriebe durch automobile Anforderungen

Die Arbeitsgruppe Weltforum für die Harmonisierung von Fahrzeugvorschriften der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) definiert den Antriebsstrang als den Teil eines Fahrzeugs, der den Speicher sowie den Wandler der Antriebsenergie und Komponenten zur Verteilung der mechanischen Antriebskraft an die Räder umfasst. Ausgehend davon wird festgelegt, dass der Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen (EV) mindestens eine elektrische Maschine (Motor bzw. Motor-Generator) für die Wandlung der Antriebsenergie aufweisen muss. Davon ausgenommen ist der elektrische Anlasser, außer dieser ist mit dem Getriebe verbunden und kann bei der Erzeugung einer Antriebskraft zumindest teilweise unterstützen. Auch zur Unterscheidung der Arten von EV erfolgt eine Gliederung nach Technologien, die zur Energiespeicherung und Energiewandlung zum Einsatz kommen, wie Tabelle 2 auflistet. [16]

	Energiespeicher	Energiewandler
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)	aufladbarer elektrischer Energiespeicher	elektrische Maschine
Hybridelektrische Fahrzeuge (HEV)	keine Einschränkung	Verbrennungsmotor & elektrische Maschine
Brennstoffzellenfahr- zeuge (FCV)	keine Einschränkung	Brennstoffzelle & elektrische Maschine
Brennstoffzellen-Hybrid- fahrzeuge (FCHV)	chemischer Energiespeicher & aufladbarer elektrischer Energiespeicher	Brennstoffzelle & elektrische Maschine

Tabelle 2: Übersicht elektrisch betriebener Fahrzeuge (in Anlehnung an: [16])

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass durch die Elektromobilität schwerpunktmäßig der automobile Antriebsstrang eine Transformation durchläuft. Dies wird von einer Studie des IMU-Instituts unterstrichen, die als elektromobilitätsspezifische, neu hinzukommende Fahrzeugkomponenten den elektrischen Traktionsmotor mit seiner Leistungselektronik sowie das System zur Bereitstellung der elektrischen Energie für diesen Antrieb identifiziert. Dieses besteht aus einem Akkumulator inklusive seines Batteriemanagementsystems oder alternativ einer Brennstoffzelle. Da unabhängig vom gewählten Speicher zur Energiewandlung stets eine elektrische Maschine eingesetzt wird, kann diese als Schlüsselkomponente von EV angesehen werden. [17]

# 2.1.1 Mobilitätstransformation durch die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs

Umweltaspekte werden neben der Verfügbarkeit fossiler Energieträger häufig als wesentlicher Treiber der Transformation zur Elektromobilität gesehen [2]. So geht die Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC) in ihrem 2018 erschienenen World Oil Outlook 2040 davon aus, dass sich zwischen 2017 und 2040 der tägliche Ölbedarf von 97,2 auf 111,7 Millionen Barrel erhöht, während ein Produktionsvolumen für konventionelles Erdöl von 111,9 Millionen Barrel je Tag prognostiziert wird. Dabei berücksichtigt das Modell einen Anstieg des Marktanteils von EV bis 2040 auf 13 %, was maßgeblich zur Reduktion und somit Deckung des Bedarfs beiträgt. [18]

Trotz einer zunehmenden Bedeutung der Umweltfreundlichkeit von Kraftfahrzeugen für den Nutzer wird die Marktdurchdringung von EV nicht in erster Linie direkt durch die Kundennachfrage, sondern durch legislative Bestimmungen angetrieben [19; 20]. So setzt die Europäische Kommission das Ziel, bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen innerhalb der Europäischen Union (EU) bezogen auf das Jahr 1990 um 80 % zu senken. Davon wird abgeleitet, dass zur Erreichung dieses Ziels im Transportsektor eine Emissionsreduktion um 60 % erzielt werden muss, was die Grundlage für die Abgasgesetzgebung der EU darstellt. [21]

Als effizienteste Art des elektrisch angetriebenen PKW werden BEV identifiziert, da diese die geringsten Verluste zwischen der zur Verfügung gestellten Primärenergie und erzeugten Bewegungsenergie aufweisen [22]. Allerdings geht deren Einsatz mit einer Vielzahl an Veränderungen im Hinblick auf die Umwelt, Nutzung sowie Wertschöpfung einher, die in Bild 2 zusammengefasst werden.



Bild 2: Veränderungen durch die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs in BEV (in Anlehnung an: [20; 22; 23; 24; 25; 26])

Angetrieben durch die Notwendigkeit zur Reduktion der Schadstoffemissionen, insbesondere in Ballungsgebieten, profitiert die Umwelt beim Einsatz von BEV von einer lokalen Reduktion der Kohlenstoffdioxid-, Feinstaub- sowie Stickoxidemissionen. Auch Lärmemissionen werden vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten deutlich reduziert. Bei Bereitstellung der Energie aus erneuerbaren Quellen können nicht nur die lokal am Fahrzeug auftretenden, sondern auch die gesamten Abgasemissionen von PKW maßgeblich gesenkt werden. Unter der Annahme einer Marktdurchdringung von sechs Millionen EV im Jahr 2030 in Deutschland errechnet das Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, dass die direkt von PKW verursachten Treibhausgasemissionen verglichen mit einem Szenario ohne EV um 23 % gesenkt werden können. Dies setzt die Deckung des Fahrstrombedarfs aus erneuerbaren Energien voraus und berücksichtigt eine Verringerung des Endenergiebedarfs von PKW um 15 % aufgrund der höheren Effizienz in der Energiewandlung von EV. [22; 27]

Zusammenfassend kommt eine vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebene Studie zu dem Ergebnis, dass basierend auf dem 2030 erwarteten Strommix BEV über den kompletten Lebenszyklus bis zu 40 % an Treibhausgasemissionen einsparen. Dies gilt im Vergleich zu Fahrzeugen mit Ottomotor und berücksichtigt auch, dass bei BEV Emissionen durch die Kraftstoffbereitstellung entfallen. [27]

Trotz des positiven Einflusses auf die Umwelt leiden insbesondere BEV unter Kaufhemmnissen. Neben dem hohen Anschaffungspreis werden die schlechte Verfügbarkeit der benötigten Ladeinfrastruktur, die lange Ladedauer und insbesondere die zu geringe Reichweite von potenziellen Nutzern bemängelt [28]. Untersuchungen haben allerdings ergeben, dass 87 % aller gefahrenen Strecken eine Entfernung von 100 km nicht überschreiten [29]. Bereits heute sind BEV, mit denen diese Entfernung zurückgelegt werden kann, verfügbar. Den angeführten Kaufhemmnissen kann durch eine verlässliche Angabe zur tatsächlichen Reichweite und Batterielebensdauer sowie Transparenz im Hinblick auf die Planung und Durchführung des Ladevorgangs entgegengewirkt werden. Außerdem ist zu erwarten, dass im Rahmen des Markthochlaufs die Preise für BEV deutlich sinken [30]. [31]

Mit BEV gehen Nutzenpotenziale einher, die das Kundenerlebnis positiv beeinflussen. So ermöglicht das ab dem Stand verfügbare hohe Drehmoment und das Entfallen von Schaltvorgängen eine Fahrdynamik, die zusammen mit einer hohen Agilität ein einzigartiges Fahrerlebnis schaffen. Durch den Entfall klassischer Antriebskomponenten entsteht das Nutzenpotenzial einer neuen Flexibilität im Hinblick auf das Fahrzeugpackage. Dieses kann zur Steigerung der Agilität genutzt werden, indem die Positionierung der Batterie den Schwerpunkt positiv beeinflusst und um vollkommen neue Innenraumkonzepte umzusetzen. Weitere technische Nutzenpotenziale liegen bei der Platzierung der Antriebe an den Rädern in einer gesteigerten Fahrstabilität durch eine flexible Verteilung der Drehmomente [32]. Des Weiteren bietet der Einsatz elektrischer Antriebe die generelle Möglichkeit zur Rekuperation von Bewegungsenergie mit dem Ziel der Reichweitensteigerung [33]. Bei der bidirektionalen Anbindung von EV an das Netz können diese zur Pufferung elektrischer Energie dienen und somit die negative Auswirkung der diskontinuierlichen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien reduzieren [34]. [26]

Insbesondere die Wertschöpfung in der Automobilindustrie wird sich durch die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs stark verändern. Kennzeichnend wird eine hohe Vielfalt an Antriebskonfigurationen sein, die sich in der Notwendigkeit flexibler Produktionssysteme und einer veränderten Priorität unterschiedlicher Produktionstechnologien auswirkt [25; 20]. Dies wird auch maßgeblich dadurch bedingt, dass sich die Zulieferindustrie durch entfallende, hinzukommende oder angepasste Fahrzeugkomponenten verändern muss [35].

#### 2.1.2 Anforderungen an Maschinen zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Elektrische Maschinen stellen dem Antriebsstrang durch die Wandlung zwischen elektrischer und mechanischer Energie ein Drehmoment zur Verfügung. Bei der Fahrt wandelt die Maschine im motorischen Betrieb elektrische in mechanische Energie um, während zum Bremsen im generatorischen Betrieb eine entgegengesetzte Energiewandlung erfolgt (Rekuperation). Hierbei treten in der elektrischen Maschine neben mechanischen Verlusten auch Eisen-, Wicklungs- sowie Magnetverluste auf, die den Wirkungsgrad negativ beeinflussen [36]. Im niedrigen Drehzahlbereich dominieren die Stromwärmeverluste der Stator- und ggf. Rotorwicklung. Die verbleibenden Verlustmechanismen nehmen mit der Drehzahl und somit steigenden elektrischen Frequenzen zu. Bild 3 stellt die auftretenden Verlustmechanismen strukturiert dar. [26]



Bild 3: Verlustmechanismen in elektrischen Maschinen (in Anlehnung an: [26; 36; 37; 38; 39])

Die elektrischen Maschinenarten unterscheiden sich im Aufbau ihres Stators und Rotors sowie der Kombination dieser Baugruppen und zeigen ein unterschiedliches Betriebsverhalten. Für automobile Traktionsantriebe kommen gegenwärtig ausschließlich Drehstrommaschinen zum Einsatz [33]. Binder und Grunditz et al. identifizieren, dass es sich hierbei um permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM), fremderregte Synchronmaschinen (FESM), Asynchronmaschinen (ASM) oder permanentmagnetunterstütze Synchronreluktanzmaschinen (PMSRM) handelt [40; 41]. Nach Oswald kommen für die Statoren der eingesetzten Maschinen neben verteilten auch konzentrierte Wicklungen zum Einsatz [42]. Eine deutlich größere Vielfalt ist bei den verwendeten Rotorbauformen zu beobachten, diese bestimmen auch das Auftreten von Rotorverlusten sowie die Möglichkeit zum Feldschwächbetrieb für die Erweiterung des verfügbaren Drehzahlbereichs. Zur Erzeugung des Drehmoments finden die zwei primär vom gewählten Rotoraufbau abhängigen Mechanismen der Lorentz- sowie Reluktanzkraft Anwendung. In Bild 4 werden die eingesetzten Maschinenarten mit ihrem Aufbau sowie typischen Vor- und Nachteilen zusammengefasst. [38]

	Drehstrommaschinen im automobilen Antriebsstrang							
Maschinenart	Reluktanz- maschinen	Synchron- maschinen		Asynchron- maschinen				
	permanentmag- netunterstützt	permanent- magneterregt		fremderregt				
Stator	Wicklung	Wicklung	Wicklung	Wicklung	Wicklung			
Rotor	vergrabene Magnete & Flussbarrieren	vergrabene oder oberflächenbest. Magnete	vergrabene oder oberflächenbest. Magnete	Erreger- wicklung	Käfigläufer			
Energiewandlung	<ul><li>Reluktanzkraft</li><li>Lorentzkraft</li></ul>	<ul> <li>Lorentzkraft</li> <li>Reluktanzkraft*</li> </ul>	<ul> <li>Lorentzkraft</li> <li>Reluktanzkraft*</li> </ul>	<ul> <li>Lorentzkraft</li> </ul>	<ul> <li>Lorentzkraft</li> </ul>			
Besonderheit	<ul> <li>reduzierter Ein- satz Permanent- magnete</li> </ul>	<ul> <li>feldorientierte Regelung zur Feldschwächung</li> </ul>	<ul> <li>Verluste Ober-/ Unterwellen</li> </ul>	<ul> <li>Rotorverluste</li> <li>einfache Feld- schwächung</li> </ul>	<ul><li>Rotorverluste</li><li>Feldschwächung</li></ul>			
Verwendung	BMW i3	<ul> <li>Nissan Leaf</li> </ul>	<ul> <li>Audi Q5 Hybrid</li> </ul>	<ul> <li>Renault Zoe</li> </ul>	<ul> <li>Tesla Model S</li> </ul>			
Drehzahlbereich	+	0	-	0	+			
Wirkungsgrad	+	+	0	0	-			
Leistungsdichte	0	+	0	-	-			
Kosten	0	-	+	0	+			
+ positiv o neutral - negativ * Reluktanzkraftanteile bei vergrabenen Magnete								

Bild 4: Einsatz elektrischer Maschinen im automobilen Antriebsstrang (in Anlehnung an: [24; 32; 38; 40; 41; 42; 43; 44; 45])

Der Einsatz und die Auslegung elektrischer Maschinen im Antriebsstrang unterliegt den in Bild 5 gesammelten automobilspezifischen Anforderungen. Durch die Fahrzeugintegration steht nur ein begrenzter Bauraum zur Verfügung, weswegen eine hohe Leistungsdichte gefordert wird [46]. Auch müssen die Maschinen in einem großen Temperaturbereich betrieben werden können und mechanischen Belastungen standhalten. Wegen des direkten Einflusses auf die Strecke, die elektrisch zurückgelegt werden kann, ist es wichtig, dass die Maschinen einen hohen Wirkungsgrad in der Energiewandlung erzielen [47]. Zusätzlich kann diese durch die Möglichkeit zur Rekuperation und ein reduziertes Gewicht des Antriebs gesteigert werden [48]. Zur Erreichung des Fahrkomforts wird eine geringe Geräuschentwicklung und Drehmomentwelligkeit der Maschine gefordert [6]. In automobiltypischen Stückzahlszenarien müssen die elektrischen Maschinen zu niedrigen Kosten in Großserie hergestellt werden [46]. Dabei ist ein besonderes Augenmerk auf eine hohe Qualität und damit einhergehende Zuverlässigkeit zu legen [49; 50]. [4]



Bild 5: Anforderungen an elektrische Maschinen zum Einsatz im automobilen Antriebsstrang (in Anlehnung an: [4; 6; 46; 47; 48; 50])

### 2.1.3 Potenziale produktseitiger Optimierungen

Zur Erfüllung automobilspezifischer Anforderungen wird gegenwärtig die Maximierung der Effizienz elektrischer Antriebe durch Wissenschaft und Industrie vorangetrieben. Wie Bild 6 zeigt, steht dabei die gleichzeitige Steigerung der Leistungsdichte und Reduktion von Rohstoffabhängigkeiten im Fokus. [31]



Bild 6: Handlungsfelder zur Optimierung elektrischer Traktionsantriebe (in Anlehnung an: [26; 48; 51; 52; 53; 54; 55])

Eine Steigerung der Leistungsdichte elektrischer Maschinen ist durch die Erhöhung der maximalen Drehzahl sowie Phasenströme zu erreichen [26]. Darüber hinaus verkürzt Lüttke zur Reduktion der axialen Baulänge elektrischer Maschinen den Wickelkopf durch den Einsatz einer Presseinheit [51]. Schiefer identifiziert in seiner Dissertation, dass die Leistungsdichte durch die Erhöhung des Kupferfüllfaktors, der maximal zulässigen Wicklungstemperatur und durch optimierte Kühlkonzepte maßgeblich beeinflusst wird [52]. Mit diesem Ziel stellen auch Liu et al. Möglichkeiten zur Wicklungskühlung gegenüber [56].

Um die Rohstoffabhängigkeiten zu reduzieren, wird in [53] eine permanentmagnetunterstützte Synchronreluktanzmaschine für Traktionsanwendungen vorgestellt, die durch den Einsatz von Strontium-Ferrit-Magneten Seltene Erden substituiert und in einem Benchmark Bestwerte für Wirkungsgrad (96 %) und Leistungsdichte (6,5 kW/l) erreicht.

Für die Steigerung der Effizienz des Antriebs verfolgen Peter et al. das Ziel, durch eine Reduktion der Masse des Rotors dessen Trägheitsmoment zu reduzieren und somit eine Steigerung des Wirkungsgrades zu erzielen, wobei eine Reduktion um 13 % rechnerisch ermittelt wird [54]. Durch eine optimierte Regelstrategie erreichen Saur et al. eine Reduktion der Eisenverluste um 10 % sowie Steigerung des Wirkungsgrades um 1,4 % [55]. In ihren Ausführungen zeigen Jurkovic et. al., dass mit einer optimierten Rotorgeometrie das magnetische Drehmoment in Folge einer Flusskonzentration gesteigert und zusätzlich ein Reluktanzdrehmoment durch ein hohes Reaktanzverhältnis nutzbar wird [48].

Neben diesen vielfältigen Optimierungsansätzen konzentriert sich die Forschung gegenwärtig auf den Einsatz von Formspulenwicklungen mit rechteckigen Leiterquerschnitten. In Bild 3 wird als wesentlicher Verlustmechanismus elektrischer Maschinen der Stromwärmeverlust der Wicklung aufgeführt, der zur Steigerung der Effizienz durch eine Senkung des Phasenwiderstands reduziert werden kann [57]. Dajaku et al. identifizieren, dass zu diesem Zweck der Kupferfüllgrad und somit Leiterquerschnitt in der Nut gesteigert und die Leiterlänge des Wickelkopfes reduziert werden kann [58].



Bild 7: Potenziale flachleiterbasierter Formspulenwicklungen (in Anlehnung an: [47])

Bild 7 verdeutlicht, dass der Kupferfüllfaktor, der als das Verhältnis des gesamten Kupferquerschnitts zur Fläche der Nut definiert ist, durch den Einsatz rechteckiger Leiter höher ausfällt, als bei Runddrahtwicklungen [59]. Zu diesem Schluss kommen auch Bickel et al., die berechnen, dass der Füllfaktor bei Flachdrahtwicklungen ein Maximum annimmt [47]. Dieser Vorteil von Formspulenwicklungen mit rechteckigem Leiterquerschnitt wird in [60], [53] und [6] angeführt. Juergens et al. bestimmen in Simulationen für den betrachteten Anwendungsfall, dass wegen des kürzeren Wickelkopfes und höheren Kupferfüllgrades der Phasenwiderstand, verglichen mit einer Runddrahtwicklung, um 32 % gesenkt werden kann [61]. Vor dem gleichen Hintergrund erzielen Park und Lim eine Reduktion um 17 % [62]. Sano et al. berechnen die AC- und DC-Verluste für Formspulenwicklungen unterschiedlicher Wickelkopfhöhen und kommen zu dem Ergebnis, dass die dominierenden DC-Verluste im Wickelkopf von dessen Höhe abhängen, während sich die AC-Verluste nur unwesentlich verändern [63]. Auch in [60] wird die geringere Wickelkopfhöhe als Vorteil von Formspulenwicklungen angeführt.

Rahman et al. zeigen im Vergleich mit einer klassischen Runddrahtwicklung, dass die analysierte Formspulenwicklung eine deutlich besser Entwärmung aufweist. Dies wird auf eine größere vom Kühlmedium umströmte Oberfläche des Wickelkopfes und bessere Wärmeleitung in der Nut zurückgeführt, was sich für den betrachteten Anwendungsfall in einer 20 °C geringeren Wicklungstemperatur widerspiegelt [64].

Allerdings ermitteln Jukovic et al., dass der Phasenwiderstand einer flachleiterbasierten Formspulenwicklung bei zunehmenden Drehzahlen zunimmt, während dieser Effekt bei einer vergleichbaren Runddrahtwicklung nicht beobachtet wird [65]. Dies ist auf eine Widerstandserhöhung in Folge von Stromverdrängungseffekten, die zunehmend bei großen Leiterquerschnitten und hohen elektrischen Frequenzen auftreten, zurückzuführen [37]. Diesen Verlustmechanismus untersuchen Du-Bar et al. für Formspulenwicklungen mit rechteckigem Leiterquerschnitt und kommen zu dem Ergebnis, dass der von Skin- und Proximity-Effekt hervorgerufene Wechselstromwiderstand maßgeblich von der Position des Leiters in der Nut abhängt und im Bereich der Nutöffnung maximal ist [46]. Bickel et al. schlagen zur Reduktion dieses Verlustmechanismus die Herstellung von Formspulen aus verdrehten, parallelen Rundleitern vor [66]. Als weitere Nachteile werden von Juergens et al. Einschränkungen in der Wicklungsauslegung angeführt, nach Jung et al. können vornehmlich full-pitch Wellenwicklungen realisiert werden [6; 61]. Dennoch gelten elektrische Maschinen mit flachleiterbasierten Formspulenwicklungen im niedrigen und mittleren Drehzahlbereich als besonders effizient [64]. So erzielt Remy durch den Einsatz dieser Wicklungsart im Vergleich zu einer Runddrahtwicklung eine Steigerung des Drehmoments um 24 % und der Leistung um 34 %, während das Bauvolumen um 22 % sowie die Masse um 13 % gesenkt werden kann [67]. Dies wird auch von An et al. bestätigt, indem die auf die Masse bezogene Leistung um ca. 9 % höher ausfällt als bei einer vergleichbaren Maschine mit Runddrahtwicklung [68].

## 2.2 Wandel der Produktionstechnologien für die Herstellung von Statorwicklungen

Aus Kapitel 2.1.3 wird ersichtlich, dass zur Anpassung elektrischer Maschinen an automobile Anforderungen insbesondere die Statorwicklung überarbeitet wird. Um den Markthochlauf von EV zu unterstützen, ist es weiterhin notwendig, durch Optimierungen in der Serienproduktion elektrischer Maschinen Kosten zu senken und deren Produktqualität zu steigern [31]. Da die Herstellung der Wicklung in diesem Kontext als Schlüsseltechnologie gesehen wird, sind insbesondere in diesem Bereich Innovationen notwendig [14].

Nach Tzscheutschler et al. ist es das Ziel der Wicklungsherstellung, zur Realisierung magnetischer Funktionen dem isolierten elektrischen Leiter eine Form zu geben und mit einem Magnetkörper zu fügen [7]. Wegen des guten Verhältnisses von Materialkosten und volumetrischer Leitfähigkeit, werden die meisten Wicklungen elektrischer Antriebe aus Kupfer hergestellt. Als weiterer Vorteil sind die guten mechanischen Verarbeitungseigenschaften anzuführen, allerdings ist zu berücksichtigen, dass trotz der hohen Duktilität Kaltverfestigungen auftreten, die mit verschlechterten Leitfähigkeitswerten einhergehen. [69]

Geometrie, Isolationsschichtstärke und Isolationswerkstoffe sowie elektrische, mechanische und chemische Eigenschaften von Wickeldrähten werden in der Normenreihe DIN EN 60317 festgelegt. Rechteckige Wickeldrähte weisen eine definierte Höhe, Breite sowie einen definierten Kantenradius auf. Der Isolationsgrad gibt die durchmesserabhängige Schichtstärke der Isolation an. Ab einer Wärmeklasse von 180 °C kommen bei lackisolierten Flachdrähten aus Kupfer Isolationen aus den Kunststoffen Polyesterimid [70], Polyamidimid [71], Polyimid [72], aromatischen Polyamiden [73], Polyester oder Kombinationen daraus [74] zum Einsatz [75].

Als Leiterwerkstoff finden nach DIN EN 13602 die Kupfersorten Cu-ETP, Cu-FRHC und Cu-OF mit einer Leitfähigkeit von mindestens 58 m/ $\Omega$ mm<sup>2</sup> Anwendung. Die sauerstoffhaltigen Kupfersorten Cu-ETP und Cu-FRHC weisen einen Kupferanteil von mindestens 99,90 % und Sauerstoffanteil

von maximal 0,04 % in Form von Cu<sub>2</sub>O auf. Bei diesen Kupfersorten besteht bei erhöhten Temperaturen ab 500 °C die Gefahr der Versprödung durch die Diffusion von Wasserstoff. Bei Cu-OF handelt es sich hingegen um sauerstofffreies, nicht desoxidiertes Kupfer mit einem Kupferanteil von mindestens 99,95 %, das gegenüber Wasserstoff beständig ist. [76; 77]

#### 2.2.1 Etablierte Technologien zur Wicklungsherstellung

Zur automatisierten Herstellung von Statorwicklungen elektrischer Traktionsantriebe kommen gegenwärtig das Linear-, Flyer- und Nadelwickeln sowie die Einziehtechnik zum Einsatz, wobei diese Prozesse die Eigenschaften der Wicklung sowie Gestaltungsfreiheit maßgeblich beeinflussen [32]. Stenzel et al. verfolgen den Ansatz, den Kupferfüllgrad zu erhöhen und entwickeln hierfür ein Wickelverfahren mit schwenkbarer Wickelnadel, wodurch ein definiertes Ablegen des Runddrahtes in der Nut erreicht wird [78]. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des Kupferfüllfaktors stellen Venturini et. al vor, indem ein runder Draht in eine rechteckige Geometrie umgeformt wird [79]. Auch Vogt erzielt durch ein Pressen verdrillter runder Leiter einen gesteigerten Kupferfüllgrad und belegt, dass Wicklungsverluste bei hohen Frequenzen mit zunehmender Verdrillung abnehmen [80]. Hofmann et al. identifizieren, dass die Qualität beim Nadelwickeln maßgeblich vom Drahtzug abhängt und konzipieren auf Basis einer Simulation eine Drahtzugregelung, welche die Trajektorie der Wickelnadel berücksichtigt [81]. Gerngroß et al. validieren den Einsatz von Robotern, um die Flexibilität des Nadelwickelverfahrens zu steigern [82]. Durch den Einsatz einer flexiblen Polkette gelingt es Akita et al., das Flyerwickeln einzusetzen und Freiräume in der Nut im Vergleich zu nadelgewickelten Zahnspulen maßgeblich zu reduzieren [83]. Für die Herstellung von Formspulen entwickeln Bickel et al. ein indirektes Nadelwickelverfahren sowie ein mit Umformvorgängen kombiniertes Linearwickeln, das für verdrillte Runddrahtbündel eingesetzt werden kann [66].

Ein Nachteil etablierter Technologien zur Wicklungsherstellung liegt darin, dass diese im Hinblick auf die erreichbare Prozessstabilität nur bedingt mit den Anforderungen der Automobilindustrie schritthalten können und zur Überführung in die Serienproduktion ein großer Aufwand notwendig ist [8]. Aus den vorangegangenen Kapiteln wird zudem ersichtlich, dass zur Herstellung leistungsdichter und effizienter Traktionsantriebe Wicklungen aus rechteckigen Leiterquerschnitten Potenziale bieten. Tabelle 3 verdeutlicht, dass nur das Linearwickeln die Möglichkeit zur Verarbeitung rechteckiger Leiterquerschnitte bietet. Allerdings muss hier eine Beschränkung auf Zahnspulenwicklungen erfolgen, die insbesondere in elektromagnetischer Hinsicht Nachteile mit sich bringen [38].

	Linearwickeln	Flyerwickeln	Nadelwickeln	Einziehtechnik nach Vorwickeln
Wicklungsart	konzentriert	<ul><li>konzentriert</li><li>verteilt</li></ul>	<ul><li>konzentriert</li><li>verteilt</li></ul>	verteilt
Magnetkörper	Einzelzähne	<ul><li>außengenutet</li><li>Polkette</li><li>Einzelzähne</li></ul>	<ul><li>außengenutet</li><li>innengenutet</li><li>Polkette</li></ul>	<ul><li>außengenutet</li><li>innengenutet</li></ul>
Rechteckdraht	möglich	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich

Tabelle 3: Etablierte Technologien zur Wicklungsherstellung (in Anlehnung an: [69; 84])

#### 2.2.2 Herstellung von Formspulenwicklungen

Wie die Einziehtechnik kann die Herstellung von Wicklungen aus vorgeformten Leiterelementen nach DIN 8593-5 (Fügen durch Umformen) nicht dem Verfahren Wickeln mit Draht zugeordnet werden [85; 86]. Vielmehr handelt es sich bei der Herstellung der Leiterelemente um ein Biegeumformen, auf das zur Montage in das Blechpaket ein Fügen durch Zusammensetzen folgt [87; 88]. Die Herstellung von Wicklungen aus vorgeformten isolierten Kupferleitern unterscheidet sich in Abhängigkeit davon, ob offene oder geschlossene Formspulen bzw. Formstäbe zum Einsatz kommen. Der wesentliche Unterschied besteht in der Komplexität und dem Umfang der durchzuführenden Prozessschritte sowie der Gestaltungsfreiheit der Nutgeometrie. Zunächst wird ein Leiterelement definierter Länge in einem oder mehreren Biegeschritten in die Zielgeometrie gebracht. Beim einfachsten Fall von Formstäben handelt es sich um ein gerades Leiterstück, bei geschlossenen Formspulen hingegen sind komplexe Geometrien herzustellen. Hierzu kommen unterschiedliche Biegeverfahren zum Einsatz. Bei der Verwendung von Isolationspapier zur Sekundärisolation kann dieses bei geschlossenen Formspulen nach [89] direkt am gebogenen Leiterelement angebracht werden, während es bei den anderen beiden Varianten in das Blechpaket eingebracht wird. Im Anschluss erfolgt die Montage der Leiterelemente in das Blechpaket, wobei dies bei offenen Formspulen und Formstäben durch axiales Einschieben in die Nuten realisiert wird. Aus geometrischen Gründen werden offene Formspulen vor dem Einschieben zu Formspulen-Körben arrangiert, um deren Montage auch bei Überschneidungen zu ermöglichen. Hingegen müssen geschlossene Formspulen radial eingesetzt werden, weswegen eine Montage nur bei offenen Nuten möglich ist [89]. Um die Kontaktierung zu ermöglichen, werden die freien Leiterenden in eine definierte Position gebogen. Bei geschlossenen
Formspulen kann dies bereits bei der Formgebung erfolgen. Dafür werden die zu verbindenden Enden in einem Schränkprozess in Umfangsrichtung gebogen, um diese nebeneinander zu positionieren. Damit zusätzlicher Raum im Bereich des Wickelkopfes geschaffen wird, erfolgt ggf. vor diesem Prozessschritt auch ein Biegen in radialer Richtung. Bei offenen Formspulen ist dies auf einer Statorseite zu realisieren, bei Formstäben ggf. auf beiden. Danach werden die freien Leiterenden in einem Kontaktierungsprozess elektrisch leitend und mechanisch miteinander verbunden. [P1; P2]

•						
	geschlossen	e Formspule	offene Fo	ormspule	Formstab	
Beispiel						
Spulenköpfe vor Montage	beidseitig ausgeformt		einseitig ausgeformt		ein- oder beidseitig nicht bzw. teilweise ausgeformt	
Windungen	> 1		1		< 1	
Nutgeometrie	offen		offen/ geschlossen		offen/ geschlossen	
Isolationspapier	Spule	direkt	Nutgrund		Nutgrund	
Herstellung	Umfang	Komplexität	Umfang	Komplexität	Umfang	Komplexität
Formgebung	+	-	0	0	-	+
Montage	+	-	0	0	-	+
Schränken	+	0	0	0	-	0
Kontaktierung	+ Umfang haba	-	0	-	-	-
	Unnang - none	Anzam 0 neutral	+ meange Alizalli	I NO	mpicanal - nocn	o neutrar + gering

Tabelle 4: Wicklungsaufbau aus vorgeformten Leitern (in Anlehnung an: [7; 37; 89])

Aus der Gegenüberstellung in Tabelle 4 wird ersichtlich, dass geschlossene Formspulen eine hohe Komplexität in den Schritten der Formgebung und Montage aufweisen, dafür aber verglichen mit den anderen beiden Varianten mit der niedrigsten Anzahl an Umform- und Kontaktierungsprozessen herzustellen sind. Insbesondere die beschriebenen Restriktionen und Komplexität der Montage führen dazu, dass diese gegenwärtig noch nicht automatisiert hergestellt werden [89]. Der größte Nachteil von Formstabwicklungen liegt darin, dass deren Leiter auf beiden Seiten des Blechpakets gefügt werden müssen und somit die größte Anzahl komplexer Kontaktierungsvorgänge durchzuführen ist. Einen Kompromiss im Hinblick auf die Komplexität der Formgebung und Montage sowie Kontaktierungsaufwände bieten offene Formspulen, die auch Hairpin genannt werden. Diese Technologie wird aktuell insbesondere von der Automobilindustrie vorangetrieben [15]. Die wesentlichen Schritte zur Herstellung dieser Wicklungsart werden in Bild 8 zusammengefasst.



Bild 8: Herstellung offener Formspulenwicklungen (in Anlehnung an: [P1; P2])

In Forschung und Industrie wird aktuell insbesondere die Herstellung offener Formspulenwicklungen adressiert. So strukturieren Riedel et al. die Prozesskette zur Herstellung offener Formspulenwicklungen und kommen zu dem Ergebnis, dass für die einzelnen Prozessschritte verschiedene Technologien mit spezifischen Vor- und Nachteilen Anwendung finden [P2]. Der Prozessschritt der Formgebung wird von Weigelt et al. in Simulationen und Validierungsexperimenten mit dem Ergebnis untersucht, dass die auftretenden Biegekräfte neben den Biegewinkeln maßgeblich von den Werkzeugradien bestimmt werden [P3]. In weiteren Simulationen wird ermittelt, dass eine von der Werkzeugauflagefläche abhängige, charakteristische Deformation des Leiters auftritt und dass der auftretende axiale Stofffluss zu einer Verdickung der Isolation am Rand der Umformzone der Innenseite führt [90]. Guercioni patentiert zahlreiche Methoden und Vorrichtungen, z.B. zur Herstellung offener Formspulen [91], zum Einbringen der geformten Hairpins [92] sowie zum Schränken deren Leiterenden [93]. In [94] wird eine Vorrichtung zum Abtrag des Isolationslacks von Formspulenwicklungen beschrieben, während Jung zum elektrischen Verbinden der Leiterenden das Aufsetzen eines Verbindungselements mit Isolationskappe vorschlägt [95]. Eine Analyse der aus den Füge- und Biegeoperationen resultierenden Streuung der Wicklungswiderstände belegt, dass diese insbesondere bei hohen Drehmomenten eine Veränderung der Effizienz zur Folge haben [P4]. Als Alternative zur Herstellung von Wellenwicklungen nach der in Bild 8 dargestellten Prozesskette kann der Wickeldraht kontinuierlich auf einem Hilfsmittel in Wellenform abgelegt und anschließend radial in das Blechpaket montiert werden [51; 96]. Dies bietet den Vorteil, dass die Anzahl der zu realisierenden Kontaktstellen stark reduziert wird, allerdings ist eine Montage wie bei geschlossenen Formspulen nur bei Statoren mit offenen Nuten möglich.

# 2.2.3 Produktionstechnische Potenziale und Herausforderungen

Die Technologie der offenen Formspulenwicklung wird automobilen Produktionsanforderungen gerecht, weil diese es ermöglicht, vollautomatisiert und mit niedriger Taktzeit Statoren elektrischer Maschinen in hohen Stückzahlen herzustellen [97]. Ein wesentlicher Vorteil liegt darin, dass die hochstochastischen klassischen Technologien zur Wicklungsherstellung durch die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen und besser beherrschbaren Formgebungs-, Montage- sowie Fügeprozesse ersetzt werden [15].

Damit diese Vorteile zum Tragen kommen, sind zunächst produktionstechnische Herausforderungen zu adressieren. Wegen der hohen Anzahl herzustellender Formspulen ist die Auswahl und Entwicklung geeigneter Formgebungsverfahren von großer Bedeutung [89; 15]. Diese müssen insbesondere eine hohe Maßhaltigkeit realisieren und sicherstellen, dass die Primärisolation der Leiter nicht beschädigt wird. Im Prozess der Vormontage sind verschiedene Vormontagebaugruppen, die Formspulen-Körbe. herzustellen. Hierbei spielt die richtige Positionierung der Leiterelemente eine wesentliche Rolle, da sonst die folgenden Prozessschritte nicht durchgeführt werden können. Das Einfügen der vormontierten Formspulen-Körbe in das Blechpaket wird durch die geringen Montagetoleranzen erschwert, wodurch die Gefahr besteht, dass die Primärisolation der Formspule oder die Nutgrundisolation beschädigt bzw. verschoben wird. Die grundlegende Anforderung an die Prozessschritte des radialen Biegens und Schränkens liegt darin, dass die Leiterenden nach Abschluss dieser Biegeprozesse exakt zueinander positioniert sein müssen, um diese miteinander verbinden zu können. Dabei ist insbesondere auch die Rückfederung der Leiterenden zu berücksichtigen. Im abschließenden Kontaktierungsprozess muss eine dauerhafte elektrische und mechanische Verbindung mit niedrigen Kontaktwiderstand zwischen den Formspulenenden hergestellt werden, wobei die Isolation nicht beschädigt werden darf. [P2]

In diesem Kontext wird der Prozessschritt der Kontaktierung als größte Herausforderung identifiziert. Jung führt dies darauf zurück, dass beim Einsatz von Schweißverfahren viele Probleme auftreten und im Fehlerfall hohe Ausschuss- bzw. Nacharbeitskosten verursacht werden. So kann bereits ab der ersten fehlerhaften Fügestelle die komplette Wicklung nicht funktionsfähig sein. Außerdem besteht die Gefahr, dass in Kontaktstellen schlechter Qualität elektrische Verluste entstehen und während des Fügeprozesses Isolationsschäden verursacht werden. Neben Jung sehen auch Ishigami et al. die große Anzahl herzustellender Kontaktstellen bei offenen Formspulenwicklungen als Herausforderung an [89]. Rahman et al. führen auf, dass im betrachteten Anwendungsfall 144 Kontaktstellen je Stator zu realisieren sind [64]. Aus diesem Grund wird auch in [15] angegeben, dass eine aktuelle Herausforderung bei der Herstellung offener Formspulenwicklungen in der Auswahl und Qualifikation geeigneter Fügetechnologien liegt. Hierbei spielt auch eine Rolle, dass der Prozessschritt der Kontaktierung innerhalb der Prozesskette als Kostentreiber gesehen wird [98]. [95]

# 2.3 Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen

Im Rahmen des Prozessschritts der Kontaktierung wird der Wickeldraht elektrisch leitfähig verbunden [99]. Hierbei ist es das Ziel im Hinblick auf die Festigkeit und den Übergangswiderstand Werte zu erreichen, die denen des unbeeinflussten Leiters entsprechen [7]. Dabei unterscheidet sich die Kontaktierung der in Tabelle 4 beschriebenen Arten vorgeformter Leiterelemente im Hinblick auf die Position der Kontaktstellen und deren Anzahl. Auf den eigentlichen Fügeprozess hat dies keinen Einfluss, folglich ist die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse der vorliegenden Dissertation sichergestellt. Zur Vereinfachung bezieht sich diese Arbeit im Folgenden auf offene Formspulen. Generell wird bei der Kontaktierung von Wicklungen aus vorgeformten Leiterelementen zwischen zwei Aufgaben unterschieden. Schwerpunktmäßig sind Kontaktstellen zwischen den Enden von zwei Formspulen zu realisieren. Zusätzlich sind Verbindungen mit Sonderelementen herzustellen. Dies erfolgt zum Schalten der Stränge, bei Phasenausleitungen oder zur Realisierung von Unstetigkeitsstellen der Wicklung, wie z.B. zum Erreichen einer Sehnung.

Aus dem Einsatz von Kontaktierungstechnologien im Kontext des Fügens von Formspulenwicklungen resultiert ein vielfältiges Spannungsfeld. Im Zentrum steht die produktseitige Anforderung, wonach ein niedriger Fügestellenwiderstand bei einer ausreichenden mechanischen Verbindungsfestigkeit zu realisieren ist [15]. Hier sind insbesondere stoffschlüssige Verbindungen vorteilhaft, da der Widerstand der Schweißnaht mit dem Leiterwiderstand vergleichbar ist und der Einfluss von Fremdschichten vernachlässigt werden kann [100; 101]. Essenziell ist auch, dass trotz der beengten räumlichen Gegebenheiten im Bereich der Fügestellen, durch die Einhaltung ausreichender Luft- und Kriechstrecken sowie die Vermeidung elektrisch leitfähiger Auswürfe, Kurzschlüsse ausgeschlossen werden. Zur Entschärfung der beengten Verhältnisse wird in [102] die versetzte Anordnung der Kontaktstellen vorgeschlagen. Um eine wirtschaftliche Herstellung von Statoren mit Formspulenwicklungen zu ermöglichen, ist es wegen der hohen Anzahl der herzustellenden Kontaktstellen notwendig kurze Taktzeiten zu realisieren. Da bereits eine schadhafte Kontaktstelle zum Ausfall der Maschine führt, ist es darüber hinaus von hoher Relevanz, die geforderten Kontaktstelleneigenschaften reproduzierbar zu erreichen [15]. Bild 9 fasst die erläuterten Abhängigkeiten strukturiert zusammen. [P1]



Bild 9: Spannungsfeld bei der Kontaktierung von Formspulenwicklungen (in Anlehnung an: [15; 103; 104; 105; 106; 107; P1])

# 2.3.1 Prozesstechnologien zum Fügen von Wicklungen

Bei der Herstellung elektrischer Maschinen kommen zahlreiche Technologien mit unterschiedlichen Eigenschaften zum Fügen von Wicklungen zum Einsatz, die in Abhängigkeit vom Anwendungsfall ausgewählt werden. Diese Verfahren können nach DIN 8593 gemäß Bild 10 strukturiert werden.



Bild 10: Technologische Alternativen zum Fügen von Wicklungen (in Anlehnung an: [69; 99; 108; 109])

Die umformenden Crimpverfahren sind dem Fügen durch Quetschen zuzuordnen, bei dem ein hohles Außenteil, die Crimphülse, derart plastisch umgeformt wird, dass diese form- und kraftschlüssig mit einer innenliegenden Litze verbunden wird [85; 110]. Crimpverbindungen dienen der Herstellung einer mechanischen sowie elektrisch leitfähigen Verbindung zwischen einem Anschlusselement und einem oder mehreren Leitern. Hierbei ist das wesentliche Merkmal, dass Hülse sowie Leiter im Prozess umgeformt werden. Während der Umformung erfolgt eine Komprimierung des Leiterbündels, woraus eine gasdichte Verbindung resultiert. Zwischen den Leitern untereinander und dem Anschlusselement bilden sich große Kontaktflächen aus, weswegen der Kontaktwiderstand zunächst mit zunehmender Umformung abnimmt. Bei Überschreitung eines optimalen Umformgrades wird der Leiterquerschnitt allerdings zu stark eingeschnürt, was sich durch zunehmende Kontaktwiderstände und eine Verringerung der mechanischen Festigkeit bemerkbar macht [11]. [112]

Die Voraussetzung zur Herstellung einer konventionellen Crimpverbindung besteht darin, dass der Leiter im Crimpbereich abisoliert sein muss [110]. Aus diesem Grund ist ein herkömmliches Crimpverfahren mit einem vorgelagerten Prozess zum Lackabtrag zu kombinieren, wohingegen die Verfahrensvarianten des Heiß- und Ultraschallcrimpens einen thermischen Lackabtrag in den Crimpprozess integrieren [P5; P6]. In Bild 11 werden diese Verfahren schematisch dem konventionellen Crimpprozess gegenübergestellt.



Bild 11: Crimpverfahren bei der Produktion elektrischer Maschinen

Im Prozess des Heißcrimpens dienen das untere und obere Crimpwerkzeug als Elektroden, zwischen denen während des Umformens der Crimphülse eine Spannung anliegt. Der resultierende Strom wird in den Elektroden und der Hülse in Wärme umgewandelt, sodass die Isolation bei Temperaturen von ca. 500 °C verbrennt. Die mechanische Verbindung resultiert aus der Umformung der Hülse. Ein Nachteil des Verfahrens liegt im starken Verschleiß der Elektroden, weswegen Spreng et al. in [P7] verschiedene Elektrodenwerkstoffe gegenüberstellen und die Erkenntnisse in [P8] um variierende Elektrodengeometrien erweitern. Dabei wird neben dem Werkzeugverschleiß auch die Verbindungsqualität berücksichtigt. Darüber hinaus erfolgt in [113] die Optimierung der Verbindungseigenschaften, Produktivität und Prozesskosten des Heißcrimpprozesses auf Grundlage eines analytischen Modells, einer numerischen Prozesssimulation sowie eines Regressionsansatzes. [P7]

Wie beim Heißcrimpen wird auch beim Ultraschallcrimpen eine Erwärmung der Kontaktstelle hervorgerufen, die dazu führt, dass die Isolation des Leiters thermisch abgetragen wird. Allerdings beruht diese Erwärmung auf ca. 530 °C darauf, dass die von der Sonotrode eingekoppelte mechanische Ultraschallschwingung in der Hülse sowie den Leitern gedämpft wird, weswegen sich diese direkt erwärmt. Zusätzlich erfolgt eine Erwärmung in Folge der Reibung zwischen Sonotrode und Hülse. Die Ausbildung der mechanischen Verbindung resultiert primär aus der Umformung der Hülse, es können aber auch Kaltverschweißungen beobachtet werden. Da die Prozessstabilität des Verfahrens noch verbessert werden muss, untersuchen Seefried et al. Möglichkeiten zur Prozessüberwachung und kommen zu dem Ergebnis, dass durch die Kombination einer maschinell durchgeführten optischen Analyse mit Daten einer Schwingungsmessung eine Vorhersage der Kontaktstellenqualität möglich ist [P9]. [P6]

Gemäß DIN 8593-0 beruht der Zusammenhalt bei Schweißverfahren auf einer Stoffverbindung [114]. Die Verfahren werden wie in Bild 12 gezeigt in Press- und Schmelzschweißverfahren eingeteilt, die wiederrum hinsichtlich des verwendeten Energieträgers zu unterscheiden sind [115]. Während bei Pressschweißverfahren die Verbindungsausbildung unter Einwirkung einer Kraft durch eine lokale Erwärmung unterstützt bzw. ermöglicht wird, erfolgt beim Schmelzschweißen ein örtlich begrenzter Schmelzefluss ohne Anliegen einer äußeren Kraft.



Bild 12: Schweißverfahren zur Kontaktierung elektrischer Maschinen

Die zur Herstellung elektrischer Maschinen eingesetzten Kupferwerkstoffe verbinden sich in Pressschweißverfahren bevorzugt in fester Phase durch Diffusion [116]. Diese atomaren Platzwechselvorgänge werden durch einen Konzentrationsunterschied, der auch bei gleichartigen Metallen vorliegt, und die Annäherung der Werkstücke auf Atomabstand, hervorgerufen [117].

Für die Kontaktierung elektrischer Maschinen finden vorwiegend zwei Verfahrensvarianten des Widerstandsschweißens Anwendung. Dabei wird ein elektrischer Strom als Energieträger genutzt [118]. Bei Verwendung von Kontaktelementen mit Hakenfahne (Bild 12, links) wird der noch isolierte Leiter in den Kontakthaken eingelegt. Dieser wird durch die Elektrode um den Leiter gebogen, während der Schweißstrom die Hakenfahne erwärmt, wodurch die Isolation verdrängt wird und sich ein elektrischer Kontakt ausbildet. Lynch et al. ermitteln, dass zur Prozessführung zwei aufeinanderfolgende Impulse, der Erste zum Biegen des Hakens um den Draht, der Zweite zum Abtrag der Isolation und Verschweißen des Leiters mit dem Anschlusselement, vorteilhaft sind. [108; 119]

Erfolgt das Verschweißen wie in Bild 12 rechts dargestellt ohne spezielles Kontaktelement, muss die Isolation vor dem Fügen entfernt werden [119]. Zur Herstellung eines Kontaktes erfolgt ein Verschweißen in fester Phase wobei darauf geachtet werden muss, dass kein Überhitzen der Kontaktstelle oder Anhaften der Elektrode auftritt. Im Prozess erfolgt zunächst eine langsame Erwärmung des Werkstoffes, die eine Umformung ermöglicht, bevor die Kraft und der Schweißstrom erhöht werden und die Verbindung ausgebildet wird. Für die Kontaktierung von Formspulenwicklungen ermitteln Peterson et al., dass die mechanischen Kontaktstelleneigenschaften maßgeblich von der Fügestellendicke nach dem Prozess abhängen. Somit ist ein Korridor zwischen einer minimal notwendigen und maximal zulässigen Leitereinschnürung einzuhalten, um gute Verbindungseigenschaften zu erzielen. [120; 121]

Im Verfahren des Kaltpressschweißens erfolgt eine Verbindung von Werkstücken unterhalb der Rekristallisationstemperatur. Durch eine plastische Verformung unter hohem Druck bewirken Kohäsionskräfte eine Bindung zwischen den Oberflächen der Werkstücke in fester Phase. Bei diesem Fügeverfahren kommt als Energieträger eine bewegte Masse zum Einsatz [118]. Als Voraussetzung zur Schaffung einer stabilen Verbindung dürfen die Oberflächen keine Verunreinigungen oder Oxidschichten aufweisen, weswegen zur Kontaktierung von Formspulenwicklungen die Lackisolation in einem vorgelagerten Prozess abgetragen werden muss. Da eine Verbindung erst ab gewissen Umformgraden entsteht, ist für Kupfer im Überlappstoß mit einer minimalen Einschnürung von 85 % zu rechnen [122; 123].

Auch im Prozess des Ultraschallschweißens stellt der Energieträger eine bewegte Masse dar [118]. Zum Fügen von Metallen koppelt die Sonotrode gemäß Bild 12 eine hochfrequente mechanische Schwingung in eines der Werkstücke ein und regt dieses zum Schwingen an. Dafür kommen häufig Frequenzen im Bereich von 20 kHz mit einer Amplitude von 10-3 mm bis 10<sup>-2</sup> mm zum Einsatz. Der zweite Fügepartner wird dabei vom Amboss gedämpft, woraus zwischen den zu fügenden Werkstücken eine Relativbewegung parallel zu den zu verbindenden Oberflächen resultiert. Dabei bringt die Sonotrode eine Kraft normal zur Verbindungsebene auf, die resultierende Spannung in den Werkstücken erreicht die Fließgrenze nicht [124]. In Folge der intensiven Reibung zwischen den Oberflächen werden Verunreinigungen und Oxidschichten abgetragen sowie die Oberflächenrauheit eingeebnet. Hieraus resultiert ein rein metallischer Kontakt zwischen den Werkstücken und eine stoffschlüssige Verbindungsausbildung auf Basis interatomarer Wechselwirkungskräfte. Die Werkstücke werden nicht aufgeschmolzen [125]. Elangovan et al. ermitteln mit Hilfe eines Taguchi-Versuchsplans, dass beim Fügen von Kupferleitern für automobile Anwendungen mittels Ultraschallschweißen die Schweißnahtqualität durch die Schwingungsamplitude, Schweißkraft und Schweißzeit maßgeblich beeinflusst wird [126]. Mit dem Ziel der Steigerung der Schweißnahtfestigkeit kombinieren Asami et al. eine lineare mit einer torsionalen Schwingungsrichtung, um eine zweidimensionale Anregung eines Fügepartners zu realisieren [127]. [128]

Beim Lichtbogenschweißen handelt es sich um ein berührungsloses Schmelzschweißverfahren, bei dem eine elektrische Gasentladung als Energieträger dient [118]. Hierzu muss zwischen dem zu verbindenden Bereich und einer Elektrode eine Zündspannung erreicht werden, damit sich durch Stoßionisation ein Lichtbogen ausbildet und auf diese Weise ein Schmelzbad erzeugt wird. Das Lichtbogenschweißen untergliedert sich in eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren. Zur Kontaktierung von Wicklungen wird häufig das Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) eingesetzt [7]. Bei diesem Verfahren zündet der Lichtbogen zwischen einer nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück, während die Schmelze durch ein Schutzgas vor Oxidation geschützt wird. Für die Kontaktierung der von ihnen entwickelten geschlossenen Formspulenwicklung schlagen Ishigami et al. den Einsatz des WIG-Schweißverfahrens vor und ermitteln je Kontaktstelle eine Schweißzeit von ca. einer Sekunde [89]. Auch in [129] wird zur Kontaktierung von Formspulenwicklungen ein Lichtbogenschweißverfahren patentiert. [117]

Wie bei Schweißverfahren basieren Lötprozesse auf stoffschlüssigen Verbindungen. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass mit dem Lot ein zusätzlicher Werkstoff eingesetzt wird, der eine niedrigere Liquidustemperatur als die Solidustemperatur der zu fügenden Werkstücke aufweist. Die Verbindung resultiert aus einer Legierungsbildung zwischen dem artfremden Lot und dem Grundwerkstoff durch Diffusionsvorgänge [130]. Liegt die Liquidustemperatur des Lotes unter 450 °C handelt es sich um ein Weichlötverfahren, bei Temperaturen darüber um ein Hartlötverfahren. Eine weitere Unterteilung erfolgt nach dem eingesetzten Energieträger, wie Bild 13 zeigt [131]. Vor dem Lötprozess ist es notwendig, einen definierten Fügespalt zwischen den Werkstücken herzustellen und Verunreinigungen und Oxidschichten zu beseitigen. Hierzu kommen Flussmittel zum Einsatz, die Oxidschichten entfernen Beläge sowie und deren Neubildung verhindern. In Abhängigkeit des gewählten Verfahrens und Isolationswerkstoffes des Leiters sowie den auftretenden Temperaturen ist die Primärisolation vor dem Lötprozess gegebenenfalls zu entfernen [119]. [132; 133]



Bild 13: Lötverfahren zur Kontaktierung elektrischer Maschinen

Beim Flammlöten kommt als Energieträger ein Gas zum Einsatz, das in einer exothermen Reaktion verbrennt und die Fügestelle erwärmt. Es ist zu beachten, dass, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, sauerstoffhaltige Kupfersorten durch Reaktion mit wasserstoffhaltigen Gasen zur Versprödung neigen. Aus diesem Grund soll Cu-ETP nicht in einem Flammhartlötprozess gefügt werden. In den Verfahren des Induktions- und Widerstandslötens dient ein elektrischer Strom als Energieträger. Analog zum Widerstandspressschweißen erwärmt beim Widerstandslöten ein zwischen zwei Elektroden fließender Strom die Fügezone, während diese die Werkstücke zusammenpressen. Beim Induktionslöten erfolgt die Erwärmung durch einen im Fügebereich induzierten Strom in Folge eines sich wechselnden Magnetfeldes, das vom Induktor hervorgerufen wird. [131; 132]

Das Verfahren des Schneidklemm-Kontaktierens ist dem Fügen durch Einpressen zuzuordnen [134]. Das zu kontaktierende Drahtende wird in eine Kavität abgelegt, in die im Anschluss die Schneidklemme eingepresst wird. Auf diese Weise können bis zu zwei Leiter mit einer Schneidklemme kontaktiert werden. Während des Prozesses durchtrennen zwei Klingen die Isolation des Leiters, wobei Verunreinigungen und Oxidschichten abgetragen werden, woraus ein elektrisch leitfähiger Kontakt resultiert [135]. Des Weiteren werden der Leiter und die Schneidklemme im Prozess verformt und die Schneidklemme schneidet in den Kupferleiter ein, sodass eine gasdichte Verbindung entsteht, wie Bild 14 verdeutlicht [136]. Die Technologie kann neben Rundleitern auch für rechteckige Leitergeometrien eingesetzt werden [137]. [99]



Bild 14: Schneidklemm-Kontaktierung von Kupferlackdraht (in Anlehnung an: [136])

Neben den beschriebenen Technologien kommen auch anwendungsfallspezifische Kontaktierungsverfahren zum Einsatz. So wird in [138] ein Verfahren patentiert, in dem nach einem Crimpprozess die Leiter zusätzlich im Verfahren des Ultraschallschweißens mit dem Anschlagteil verbunden werden. Wolf beschreibt in [139] ein stoffschlüssiges Verbindungsverfahren durch den Einsatz einer exotherm reagierenden Nanofoil, wodurch ein Verschweißen oder Verlöten der Leiter hervorgerufen wird. In [140] soll eine Kontaktierung ohne vorherigen Abtrag der Isolationsschicht ermöglicht werden, indem ein leitfähiger Klebstoff mit scharfkantigen Partikeln, welche die Isolation durchstoßen, eingesetzt wird. Zur Kontaktierung von Litzenenden ohne Verbindungselement werden in [141] und [142] das Kompaktieren mittels Ultraschall- und Widerstandsschweißen untersucht. Darauf aufbauend wird, um Formspulenwicklungen aus Litzen bzw. Drahtbündeln kontaktieren zu können, in [P10] die Kombination des Ultraschallkompaktierens mit einem Laserstrahlschweißprozess vorgeschlagen.

# 2.3.2 Abtrag der Isolationsschicht von Kupferleitern

Die zur Herstellung von Formspulenwicklungen eingesetzten Leiter mit rechteckigem Querschnitt weisen eine Isolationsschicht aus Thermoplasten oder Duromeren auf. Hierbei wird auf ein großes Spektrum an Werkstoffen und Kombinationen zurückgegriffen, weswegen Tabelle 5 die Eigenschaften wesentlicher Isolationsstoffe zusammenfasst. Bei den nicht quervernetzten Thermoplasten kann ein Aufschmelzen des Werkstoffes erfolgen, während dies bei den quervernetzten Duromeren nicht möglich ist [143].

Tabelle 5: Eigenschaften von	Isolationswerkstoffen i	in elektrischen	Antrieben	(Daten:	[70;
71; 72; 143; 144; 145; 146; 147])					

	Polyetheretherketon	Polyimid	Polyamidimid	Polyesterimid
Kurzbezeichnung	PEEK	PI	PAI	PESI
Kunststofftyp	Thermoplast	Duromer*	Thermoplast	Thermoplast
Wärmeklasse	250	220	220	180
Durchschlagspannung	19 kV/mm	200 kV/mm	25 kV/mm	230 kV/mm
chemische Beständigkeit	+	0	+	0
Gleiteigenschaften	+	+	0	0
Gieneigensenatien	F	F	0	0

\* in Abhängigkeit der Herstellung auch als Thermoplast verfügbar

+ gut o neutral - schlecht

Der Isolationsstoff wird in einer Düsenlackierung oder mit Hilfe eines Filzes auf den Kupferleiter aufgebracht und anschließend getrocknet. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die erforderliche Isolationsstärke erreicht ist. Einzig bei Drähten mit einer Isolation auf Basis von PEEK erfolgt die Isolationsaufbringung in einem Extrusionsprozess [148]. [69]

In Abhängigkeit der gewählten Fügetechnologie und Werkstoffe muss im Rahmen der Kontaktierung die Isolation vor der Fügeoperation abgetragen werden [109]. Sofern dies notwendig ist, haben Fehler im Abtragsprozess, wie z.B. ein unvollständiger Isolationsabtrag oder die Entfernung von Leitermaterial, einen negativen Einfluss auf den Fügeprozess und die Zuverlässigkeit des Produktes [108]. So wird insbesondere bei Schmelzschweißprozessen erwartet, dass die verbrennende bzw. verdampfende Isolation in das Schmelzbad ausgast und dieses negativ beeinflusst [P1].

Zum Isolationsabtrag bei rechteckigen Leitern können thermische, mechanische und chemische Verfahren eingesetzt werden, die den Trennverfahren nach DIN 8580 zuzuordnen sind [149]. In Bild 15 werden gängige industriell eingesetzte Mechanismen gegenübergestellt. [113]



Bild 15: Etablierte Verfahren zum Abtrag der Isolation von rechteckigen Kupferleitern

Die Entfernung der Isolation kann chemisch durch Ätzabtragen erfolgen. Hierbei wird eine chemische Reaktion eines flüssigen Wirkmediums mit dem Isolationswerkstoff hervorgerufen, wobei sich dieses leicht vom Werkstück entfernen lässt [150]. Die eingesetzten Chemikalien lösen die Isolation bei erhöhten Temperaturen innerhalb einiger Minuten rückstandslos auf und müssen auf das Isolationssystem abgestimmt sein [151].

Auch die thermische Entfernung der Isolation mittels induktiver Erwärmung ist nach DIN 8590 den Abtragsverfahren zuzuordnen. Dabei wird die zum Abtrag erforderliche Wärme durch induzierte Ströme direkt im Werkstück erzeugt. Spreng et al. ermitteln, dass im Prozess Temperaturen von bis zu 860 °C auftreten, wodurch die Isolation verbrennt. Allerdings stellt sich als nachteilig heraus, dass die Verbrennungsrückstände in einem nachgelagerten Prozess abgetragen werden müssen und dass die Leiteroberfläche stark oxidiert. Zur Erzielung einer metallisch blanken Oberfläche kann die Oxidschicht in einem reduzierenden Plasma oder Gasstrom entfernt werden [152]. In dem von Immler et al. patentierten Verfahren wird der Isolationslack mittels induktiver Erwärmung versprödet und im Anschluss durch Druckluft entfernt [153]. Hingegen wird in [154] die Isolation in Folge der induktiven Erwärmung verdampft. [150; P11]

Der Isolationsabtrag mittels rotierender Bürsten und Abschälen ist nach DIN 8589-o dem Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide zuzuordnen [155]. Durch Positionieren des Leiters zwischen zwei rotierenden Drahtbürsten wird die Isolation durch das Bürstwerkzeug mechanisch abgetragen, weswegen das Verfahren dem Bürstspanen zuzuordnen ist [156; 157]. Beim Abschälen der Isolation schneiden, wie in Bild 15 gezeigt, Klingen durch die Isolation in den Leiterwerkstoff ein und werden mit einer Vorschubbewegung entlang der Oberfläche geführt, wodurch die Isolation abgetragen wird. Um die Isolation im Bereich der Kantenradien zuverlässig entfernen zu können, muss dabei bis in den Leiterwerkstoff eingeschnitten werden, wodurch auch Kupfer abgetragen wird. Das beschriebene Verfahren ist nach DIN 8589-9 dem Schaben zuzuordnen [158].

# 2.3.3 Anwendungsszenarien und technologische Potenziale von Kontaktierungstechnologien

Aus den vorausgegangenen Kapiteln wird ersichtlich, dass im Kontext der Kontaktierung eine Vielzahl an Prozesstechnologien eingesetzt werden, die in unterschiedlichsten Anwendungsfällen mit spezifischen Anforderungen konfrontiert werden. Hierbei tragen die weitreichenden Möglichkeiten zur Auslegung von Wicklungen zur Komplexität bei. Wicklungen bestehen aus Strängen, wobei ein Strang den Teil darstellt, der mit einem phasengleichen Strom beaufschlagt wird. Die Spulen eines Strangs, die unmittelbar nebeneinanderliegen, werden als Spulengruppe bezeichnet und setzen sich aus Einzelspulen zusammen. Zur Strukturierung von Kontaktierungsvorgängen können diese in drei Kontaktierungszwecke eingeteilt werden. Neben dem Schalten der Maschine und der Realisierung einer Ausleitung zum Anschluss der Wicklung sind Komponenten eines Strangs zu verbinden, wenn das eingesetzte Wickelverfahren nicht dessen durchgängige Herstellung ermöglicht. Hingegen wird beim Schalten der Wicklung häufig je ein Ende der Stränge zu einer Stern- oder Dreiecksschaltung zusammengeführt, während die verbleibenden freien Enden an das Drehstromnetz oder einen Umrichter angeschlossen werden müssen [38]. Dazu finden neben Anschlagelementen auch direkte Verbindungen auf Anschlussterminals Anwendung. [37]

Die Verfahrenseignung einer Kontaktierungstechnologie hängt vom Kontaktierungszweck und der Wicklungsauslegung ab. Im Hinblick auf die Wicklungsauslegung bestimmt neben der Geometrie und dem Werkstoff des Leiters auch die Primärisolation direkt die Gestalt der zu realisierenden Kontaktstelle. Des Weiteren wirkt sich hier auch die Topologie, mit der die Spulengruppen zu einem Strang kombiniert werden, aus, da insbesondere bei Parallelschaltungen eine höhere Anzahl an Leitern miteinander verbunden werden muss. Häufig sind Kontaktstellen im Bereich des Wickelkopfes zu realisieren, hier spielt dessen Komplexität und der zur Verfügung stehende Raum eine maßgebliche Rolle. Als wesentliche Einflussgrößen können die Anordnung der Spulen im Magnetkörper zu einer konzentrierten oder verteilten Wicklung sowie die Spulenweite angeführt werden. Zusammen mit einer ggf. auftretenden Sehnung und dem Einsatz von Schalt- und Verbindungselementen ergibt sich die Anzahl der Ebenen des Wickelkopfes. Das Raumangebot wird außerdem maßgeblich von der Anzahl der Spulenseitenschichten je Nut beeinflusst. In Kombination mit der Gestaltung der Stränge beeinflusst diese Größe des Weiteren die Anzahl der durchzuführenden Kontaktierungsoperationen und somit die zulässigen Prozesszeiten. [38]



Bild 16: Einsatzpotenziale von Kontaktierungstechnologien (in Anlehnung an: [113; P1; P12; P13; S1; S2])

Bei der Auswahl einer für den Anwendungsfall geeigneten Kontaktierungstechnologie sind neben der Sicherstellung der Verfahrenseignung auch technische und wirtschaftliche Anforderungen zu berücksichtigen. Bild 16 fasst die wesentlichen Einflussgrößen auf Kontaktierungsprozesse sowie Potenziale der eingesetzten Technologien zusammen und unterstützt die Auswahl geeigneter Prozesstechnologien. In Abhängigkeit der gewählten Fügetechnologie muss diese zur Kontaktierung mit einer Technologie zum Lackabtrag kombiniert werden. Für diesen Prozessschritt wird neben der Taktzeit die wesentliche Forderung, die Isolation bei einer hohen Reproduzierbarkeit rückstandsfrei abzutragen, identifiziert. Dabei darf die Isolation außerhalb des Abtragsbereichs nicht mechanisch oder thermisch geschädigt werden und lose anhaftende Isolationsteile sind zu vermeiden. Um den Leiterquerschnitt darüber hinaus nicht negativ zu beeinflussen, soll möglichst wenig Leitermaterial abgetragen und der Leiter nicht verformt werden. [P14]

# 2.4 Kontaktierung von Wicklungen im Laserstrahlschweißverfahren

Bei der Herstellung elektrischer Maschinen mit einer flachleiterbasierten, offenen Formspulenwicklung sind, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, insbesondere zum Verbinden der Formspulen zu Wicklungssträngen eine große Anzahl an Kontaktstellen herzustellen. Hierbei müssen die Formspulenenden mit rechteckigem Querschnitt im Bereich des Wickelkopfes kontaktiert werden. Nach den Kriterien der in Bild 16 entwickelten Bewertungssystematik eignet sich das Verfahren des Laserstrahlschweißens für die Verbindung von zwei Kupferleitern rechteckigem Querschnitts und kann auch unter den beengten Bedingungen im Wickelkopf eingesetzt werden. Zusätzlich zeigt die Technologie Potenziale, bei kurzen Prozesszeiten gute Verbindungseigenschaften zu erzielen. Der bevorzugte Einsatz dieser Technologie zum Fügen von Formspulenwicklungen ist auch in [159] aufgeführt. Allerdings sind hohe Investitionskosten zu erwarten und ein gesonderter Lackabtrag ist notwendig. [P1]

Im Prozess des Laserstrahlschweißens werden stoffschlüssige Verbindungen in einem Schmelzschweißverfahren hergestellt, wobei der Fügestelle Wirkenergie in Form von Strahlung zugeführt wird [115]. Dies wird auch durch die Abkürzung LASER, die für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation steht, verdeutlicht. Laserstrahlung stellt eine intensive, monochromatische elektromagnetische Strahlung mit hoher Kohärenzlänge dar. Für deren Erzeugung werden angeregte Energieniveaus eines laseraktiven Mediums mit langer Abklingzeit durch Strahlungsabsorption von Elektronen besetzt. Bei Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit einem dieser Elektronen wird eine stimulierte Emission hervorgerufen, welche die einfallende Strahlung verstärkt. Da Emission sowie Absorption gleichzeitig stattfinden, erfolgt eine Verstärkung der einfallenden Strahlung erst nach dem Erreichen einer Besetzungsinversion. [160; 161]

Bei der Lasermaterialbearbeitung kommt der Absorption eine Schlüsselrolle zu. Diese bestimmt die vom Werkstück absorbierte Strahlungsleistung P<sub>L, e</sub>, die in Wärme umgewandelt wird. Der Absorptionsgrad α berechnet sich als das Verhältnis der eingekoppelten zur auftreffenden Laserleistung P<sub>L, e</sub>/P<sub>L, a</sub> und nimmt Werte zwischen null und eins an. Bei metallischen Werkstoffen erfolgt die Absorption in einer dünnen, oberflächennahen Schicht. Sie hängt, neben der Wellenlänge der einfallenden Strahlung  $\lambda$ , von den werkstoffabhängigen optischen Konstanten, der geometrischen und chemischen Oberflächenbeschaffenheit sowie der Werkstücktemperatur  $\theta_W$  ab. [162]

Generell sind beim Laserstrahlschweißen die zwei Modi Tief- und Wärmeleitungsschweißen zu unterscheiden. Der Übergang zwischen den beiden Modi erfolgt bei Erreichen eines Schwellenwerts des Strahlparameterquotienten. Dieser berechnet sich als die auf den Brennfleckdurchmesser d<sub>B</sub> bezogene auftreffende Laserleistung PL, a. Hierbei nimmt der Schwellenwert für zunehmende Vorschubgeschwindigkeiten f und Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda_{th}$  sowie abnehmende Absorptionsgrade  $\alpha$  höhere Werte an [163]. Unterhalb des Schwellenwerts findet Wärmeleitungsschweißen statt, bei dem die Strahlung an der Oberfläche des ebenen Schmelzbads eingekoppelt wird und der Energietransport im Schmelzbad vornehmlich konduktiv erfolgt. Hingegen bildet sich bei Überschreiten der Schwelle durch den aus verdampfendem Material resultierenden Druck eine Dampfkapillare, die auch als Keyhole bezeichnet wird, aus. Bei Wellenlängen  $\lambda$  im Bereich von ca. 1000 nm resultiert die Energieeinkopplung aus einer Fresnelabsorption an der Kapillarwand. Durch Vielfachreflexionen steigt der Absorptionsgrad α sprungartig an, wodurch hohe Einschweißtiefen tw erzielt werden können. Es bildet sich ein Schmelzbad aus, das die Dampfkapillare umfließt. [161]

# 2.4.1 Herausforderungen beim Schweißen von Kupfer mit Laserstrahlung

Das Laserstrahlschweißen von Kupfer stellt wegen dessen Werkstoffeigenschaften eine Herausforderung dar. So liegt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{th}$  von Kupfer-ETP ( $\lambda_{th} \le 386$  W/mK) bei Raumtemperatur um ca. den Faktor acht höher als bei unlegierten Stahl ( $\lambda_{th} = 50$  W/mK) [9]. Dabei bestimmt die hohe Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{th}$  die erzielbaren Einschweißtiefen t<sub>w</sub> und begünstigt ein schnelles Erstarren der Schmelze, was sich in unregelmäßigen Schweißnahtgeometrien auswirkt, wenn das Schmelzbad trotz Turbulenzen erstarrt [164]. Darüber hinaus weist Kupfer im festen Zustand, insbesondere für die häufig eingesetzte infrarote Laserstrahlung mit einer Wellenlänge  $\lambda$  im Bereich von 1000 nm, einen geringen Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  von ca. 5 % auf, was auch mit der Gefahr starker Reflexionen und Schäden an optischen Komponenten einhergeht [163; 165]. Zum Tiefschweißen muss daher ein hoher Strahlparameterquotient durch eine hohe auftreffende Laserleistung P<sub>L, a</sub> und einen geringen Strahltaillendurchmesser d<sub>0</sub> realisiert werden. [166]

Der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  von Kupferwerkstoffen weist in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit und Oxidation starke Schwankungen von bis zu 10 % auf [165; 166]. Zusätzlich verändert sich dieser in Abhängigkeit der Werkstücktemperatur  $\theta_W$  [167]. Eine sprunghafte Zunahme des Absorptionsgrades  $\alpha$  erfolgt zunächst beim Phasenübergang von fest zu flüssig und, wie unter 2.4 beschrieben, bei der Ausbildung einer Dampfkapillare. Hingegen nimmt die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{th}$  mit zunehmender Werkstücktemperatur  $\theta_W$  ab. Dieses Verhalten von Kupferwerkstoffen führt in Kombination dazu, dass die Gefahr eines unkontrollierten Anstiegs der Werkstücktemperatur  $\theta_W$  besteht, der einen nicht kontrollierbaren Tiefschweißprozess hervorrufen kann. [165]

Um Schweißnähte mit ebener Oberfläche herstellen zu können, muss das Schmelzbad im Bereich der Erstarrungslinie möglichst ruhig sein. Da der Laserstrahl beim Tiefschweißen vor der Kapillare für ein stetiges Aufschmelzen von Material sorgt, das um diese herum fließt, werden Strömungen im Schmelzbad hervorgerufen, denen die Viskosität entgegenwirkt [161]. Allerdings weist Kupferschmelze bei einer Temperatur der Schmelze  $\theta_m$  von 1600 °C im Vergleich zu Eisen (5,22 Ns/m<sup>2</sup>) eine niedrige dynamische Viskosität  $\eta_{dyn}$  (2,10 Ns/m<sup>2</sup>) auf [168]. Dies führt dazu, dass sich die Strömungen auf das komplette Schmelzbad ausbreiten, was starke Turbulenzen zur Folge hat. Fabbro et al. ermitteln, dass Schweißspritzer durch ein unruhiges Schmelzbad hinter dem Keyhole verursacht werden [169]. [164]

Eine weitere Herausforderung beim Laserstrahlschweißen von Kupfer liegt darin, dass der Werkstoff beim Tiefschweißen zu Schmelzeauswürfen und zur Bildung von Poren neigt. Diese verursachen bereits oberflächlich sichtbare Poren in der Schweißnaht, welche die elektrischen und mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen. Hiermit wird auch die geringe Oberflächenspannung von Kupferschmelze in Verbindung gebracht [170]. Heider et al. ermitteln, dass in Folge eines Abknickens des unteren Bereichs der Dampfkapillare gegen die Vorschubrichtung die Absorption zunimmt, wodurch sich in diesem Bereich eine Blase ausbildet. Dies führt dazu, dass große Mengen geschmolzenen Materials ausgeworfen werden und eine Kavität zurückbleibt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Shigeki et al., indem sie ein instabiles Keyhole als Ursache für Auswürfe und Poren identifizieren, wobei Poren zurückbleiben, wenn die Schmelze vor dem Aufsteigen von Blasen erstarrt [171]. Schaumberger beschreibt, dass Poren das Abkühlprofil der Schweißnaht beeinflussen, weswegen sich eine Infrarotthermografie zu deren Detektion eignet [172]. [173]

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, neigt sauerstoffhaltiges Kupfer in wasserstoffhaltiger Atmosphäre zur Versprödung. Hierbei wird Cu<sub>2</sub>O, das sich an den Korngrenzen sammelt, von Wasserstoff zu Kupfer und Wasserdampf reduziert. Der resultierende Dampfdruck führt zu einem Sprengen des Gefüges entlang der Korngrenzen. [9]

# 2.4.2 Systemtechnik zum Fügen von Kupferwerkstoffen

Strahlquellen können nach dem Aggregatszustand des aktiven Mediums in Festkörper-, Flüssigkeits- und Gaslaser unterteilt werden, sowie nach der Betriebsart in kontinuierliche und gepulste Laser. Die emittierte Wellenlänge  $\lambda$  ergibt sich aus dem eingesetzten aktiven Medium, während es auch einen Einfluss auf die maximal erreichbare Leistung P<sub>L</sub> und bei gepulsten Systemen die minimal mögliche Pulsdauer t<sub>P</sub> hat. [174]

Der Radius w eines Strahls mit gaußförmiger Intensitätsverteilung wird so festgelegt, dass 86,5 % der Laserleistung P<sub>L</sub> innerhalb der sich ergebenden Kreisfläche liegen. Ein frei propagierender Laserstrahl in der Grundmode TEM<sub>00</sub> weist einen Divergenzwinkel  $\varphi_{div}$  auf. Mit diesem weitet sich der Strahl bei zunehmendem Abstand von der Strahltaille auf. Da reale Laserstrahlen von diesem idealen Modell abweichen, wird die Beugungsmaßzahl M<sup>2</sup> eingeführt, die proportional zum Divergenzwinkel  $\varphi_{div}$  ist und es ermöglicht, reale Strahlen wie ideale gaußsche TEM<sub>00</sub>-Strahlen zu behandeln. Hieraus folgt, dass der bei Fokussierung eines Laserstrahls der Wellenlänge  $\lambda$  und des Durchmessers d<sub>e</sub> mit einer Linse der Brennweite f<sub>L</sub> durch Diffraktion begrenzte minimal erreichbare Strahltaillendurchmesser d<sub>0</sub> proportional mit M<sup>2</sup> zunimmt, wie Gleichung 1 verdeutlicht. [175; 176]

$$d_0 = \frac{4 \times M^2 \times f_L \times \lambda}{\pi \times d_e}$$
 [176] (1)

Der Absorptionsgrad  $\alpha$  von Kupfer im festen Zustand nimmt mit kürzer werdenden Wellenlängen  $\lambda$  zu, wobei dieser im Bereich von  $\lambda \approx 600$  nm sprungartig ansteigt [177]. Dieses Verhalten nutzen Pelaprat et al. indem sie mit einem blauen Diodenlaser ( $\lambda = 450$  nm; P<sub>L, max</sub> = 600 W; d<sub>0</sub> = 200 µm) Schweißungen von Kupfer durchführen und im Dauerstrichbetrieb Einschweißtiefen t<sub>w</sub> von bis zu 1 mm erreichen [178]. Für die gleiche Wellenlänge wird in [179] und [180] ermittelt, dass sowohl beim Keyhole- als auch Wärmeleitungsschweißen nur wenige Schweißspritzer und Poren auftreten.

Ramsayer et al. ermitteln für einen frequenzverdoppelten grünen Dauerstrichlaser ( $\lambda$  = 515 nm; P<sub>L, max</sub> = 325 W; d<sub>o</sub> ≈ 48 µm) den Absorptionsgrad  $\alpha$ von Kupferlegierungen im festen Zustand und vergleichen diesen mit denen eines Infrarotlasers ( $\lambda$  = 1030 nm) ähnlicher Strahleigenschaften. Während der infrarote Laser Absorptionsgrade  $\alpha$  bei desoxidiertem Kupfer PHC im festen Zustand von ca. 6 % erreicht, erzielt der grüne Laser Werte von ca. 43 %. Allerdings wird auch gezeigt, dass im Bereich des Tiefschweißens zwischen den beiden Wellenlängen  $\lambda$  keine großen Unterschiede vorliegen. Mit dem grünen Laser hergestellte Schweißnähte zeigen eine geringere Breite als die des Infrarotlasers und, unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit f, eine niedrige Anzahl an Fehlern und Schweißspritzern. Dies wird bei Infrarotlasern erst ab höheren Vorschubgeschwindigkeiten f erreicht. Engler et al. kommen zu dem Ergebnis, dass der Absorptionsgrad α bei infraroten Lasern im festen Zustand, in Abhängigkeit des Oberflächenzustands, um den Faktor fünf schwankt, während er sich bei grünen Lasern nur leicht verändert [166]. Da grüne Dauerstrichlaser mit einer Laserleistung P<sub>L</sub> im kW-Bereich nicht verfügbar sind, verwenden Alter et al. zum Fügen von Cu-ETP ein gepulstes System ( $\lambda = 515$  nm; P<sub>L m. max</sub> = 4 kW;  $d_0 = 150 \ \mu m$ ) und erreichen maximale Einschweißtiefen t<sub>w</sub> von ca. 1,25 mm [181]. Aus dem gleichen Grund kombinieren Pricking et al. drei Dauerstrichlaser in einer Faser ( $\lambda$  = 515 nm; P<sub>L</sub> = 3 kW; d<sub>0</sub> = 200 µm) und erzielen in Cu-ETP bei guter Nahtqualität Einschweißtiefen tw bis 2,5 mm [182]. [183]

Hess et al. kombinieren einen grünen und einen infraroten Laser und zeigen, dass ein, dem Infrarotlaser vorauseilender, grüner Laser das Cu-ETP erwärmt und aufschmilzt, wodurch die Schwelle zum Erreichen des Tiefschweißens für den infraroten Laser gesenkt wird. Darüber hinaus wird gezeigt, dass ein nacheilender grüner Laser die Anzahl der Auswürfe leicht verringert. [184] Liebl et al. identifizieren eine weite Verbreitung infraroter Laser im Wellenlängenbereich von  $\lambda \approx 1000$  nm im industriellen Umfeld, weswegen sich deren Einsatz anbietet. Allerdings weisen diese bei Kupferwerkstoffen einen niedrigen Absorptionsgrad  $\alpha$  auf, was dazu führt, dass der in 2.4 beschriebene Strahlparameterquotient hohe Werte annehmen muss, um ein Aufschmelzen und Tiefschweißen zu ermöglichen. So ermittelt Heider, dass Einschweißtiefen tw von über 1 mm nur im Tiefschweißen erreicht werden können, wozu Lasersysteme mit einer Laserleistung P<sub>L</sub> von 5 kW einen Strahltaillendurchmesser d<sub>0</sub> aufweisen müssen, der kleiner als 200 µm ist [104]. Dies wird durch Laser, die eine hohe Laserleistung P<sub>L</sub> und gute Fokussierbarkeit kombinieren, erreicht, die als brillante Infrarotlaser bezeichnet werden. [166; 185]

### 2.4.3 Prozessoptimierungen zum Schweißen von Kupferwerkstoffen mit infraroter Laserstrahlung

Aus Kapitel 2.4.2 wird sichtbar, dass grüne und blaue Laser zum aktuellen Zeitpunkt hinsichtlich der erzielbaren Einschweißtiefen tw in Kupferwerkstoffen limitiert sind. Wiedenmann et al. kommen zu dem Ergebnis, dass gegenwärtig nur Infrarotlaser verfügbar sind, mit denen hohe Schweißnahttiefen erzielt werden können [186]. Auch Petring et al. sehen Potenziale zum Schweißen von Kupferwerkstoffen mit Infrarotlasern, die auch Heß in [163] belegt, indem er in Cu-ETP durch den Einsatz eines leistungsfähigen Infrarotlasers Einschweißtiefen tw im Bereich von 4 mm erreicht [187]. Allerdings sind Maßnahmen zu treffen, um den in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Herausforderungen zu begegnen.

Zum Schweißen von Kupfer mit infraroten Lasern müssen geeignete Parameterregime gewählt werden. Herrmann et al. ermitteln, dass das Prozessfenster von drei Grenzen eingeschränkt wird. Um hohe Einschweißtiefen tw zu erzielen, muss die Grenze zwischen dem Wärmeleitungsschweißen und dem Tiefschweißen überschritten werden. Bei hohen Laserleistungen P<sub>L</sub> und niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten f nehmen Auswürfe sowie die Porenbildung zu. Im Gegensatz dazu treten bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten f Buckel auf der Schweißnahtoberfläche auf. Dieser Effekt wird als Humping bezeichnet und äußert sich durch periodisch auftretende Nahteinfälle und –überhöhungen, die aus Unregelmäßigkeiten der Strömung im Schmelzbad hinter dem Keyhole resultieren [161]. Auch Miyagi et al. kommen zu dem Ergebnis, dass sich das Keyhole bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten f stabilisiert und die Einschweißtiefe tw abnimmt [188]. Bild 17 verdeutlicht die geschilderten Grenzen. [164]



Bild 17: Prozessgrenzen beim Schweißen von Kupfer mit infraroten Lasern (in Anlehnung an: [164; 189])

Gedicke et al. identifizieren bei schwer zu schweißenden Werkstoffen, wie Kupfer, eine gezielte zeitliche und räumliche Steuerung der Laserleistung  $P_L$  als Möglichkeit zur Prozessstabilisierung. Dazu werden zwei Arten der Leistungsmodulation vorgeschlagen. Bei der örtlichen Leistungsmodulation führt der Brennpunkt bei konstanter Laserleistung  $P_L$  relativ zur Vorschubbewegung eine periodische Bewegung aus, die verschiedene Geometrien aufweisen kann. Hingegen ist die zeitliche Leistungsmodulation unabhängig vom Vorschub als zeitbezogene Änderung der Laserleistung  $P_L$  zu verstehen. [190]

Haeusler et al. erzielen beim Einsatz einer zirkularen Strahloszillation ähnliche Einschweißtiefen t<sub>w</sub> wie ohne diese Maßnahme und beobachten eine Abnahme der Rauheit der Schweißnaht, woraus sie auf eine Beruhigung des Schmelzbads schließen [191]. Für die gleiche Strategie zur örtlichen Leistungsmodulation zeigen Miyagi et al., dass sich die Bildung von Schweißspritzern und Defekten in der Schweißnaht beim Kupferschweißen generell verringert, während der Effekt mit zunehmenden Oszillationsfrequenzen  $f_{\delta}$  und Amplituden  $A_{\delta}$  stärker wird [192]. Auch Franco erzielt mit dieser Variante der Leistungsmodulation die maximale Abnahme an Auswürfen, allerdings können kleine Poren in der Naht nicht vermieden werden [193].

Heider et al. setzen eine zeitliche Leistungsmodulation ein, in der die Laserleistung P<sub>L</sub> sinusförmig oszilliert, sodass der Strahlparameterquotient um den Schwellenwert zum Tiefschweißen schwingt und eine Stabilisierung des Keyholes erreicht wird [194]. Mit der gleichen Strategie wird in [173] bei der Modulationsfrequenz f<sub>z</sub> = 200 Hz das Wachstum von Blasen am Kapillargrund unterdrückt und die Bildung von Schweißspritzern und Auswürfen reduziert. Die wesentlichen Parameter der beiden Arten der Leistungsmodulation fasst Bild 18 zusammen.



Bild 18: Übersicht gängiger Leistungsmodulationen (in Anlehnung an: [195; 196])

# 2.5 Ableitung des Forschungsbedarfs und Lösungsweg der Arbeit

Der Einsatz flachleiterbasierter Formspulenwicklungen zeigt Potenziale zur großserientauglichen Herstellung leistungsfähiger automobiler Traktionsantriebe. Allerdings liegt die Herausforderung bei deren Herstellung in der hohen Anzahl der zu realisierenden Kontaktstellen, weswegen der Prozessschritt der Kontaktierung in diesem Kontext einen Schlüsselprozess darstellt. Gegenwärtig etablierte Kontaktierungstechnologien sind für diesen Anwendungsfall nur bedingt geeignet und genügen insbesondere den Anforderungen an Prozesszeit, Verbindungsqualität und Platzbedarf nicht. Aus diesem Grund rückt bei der Wahl einer geeigneten Prozesstechnologie das Laserstrahlschweißen in den Fokus, da es kurze Prozesszeiten und hohe Einschweißtiefen ermöglicht. Zusätzlich kann das kontaktlose Verfahren auch bei einem geringen Platzangebot Anwendung finden. Leistungsfähige und stark fokussierbare Laser im infraroten Wellenlängenbereich zeigen die besten Möglichkeiten zur Umsetzung dieser Fügeaufgabe. Allerdings ist der Prozess wegen der Eigenschaften des eingesetzten Kupferwerkstoffes als herausfordernd einzustufen. Im Kontext der Kontaktierung muss des Weiteren die Lackisolation der Leiter im Fügebereich vor dem Laserstrahlschweißen entfernt werden. Auch für diesen Prozessschritt zeigen laserbasierte Verfahren große Potenziale, da diese bei geringem Wärmeeintrag und ohne Abtrag von Grundmaterial Beschichtungen entfernen können.

Die aufgeführten Prozesstechnologien ermöglichen die Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen in der Großserie. Um mit deren Hilfe einen stabilen Prozess zu realisieren, müssen die grundlegenden Wechselbeziehungen zwischen den Prozessgrößen und resultierenden Werkstückeigenschaften bekannt sein. Zusätzlich sind Wechselwirkungen mit weiteren Prozessschritten der Fertigungskette zu identifizieren, um Abweichungen der Kontaktstellenqualität erklären und kompensieren zu können [P12]. Die Relevanz der prozesskettenübergreifenden Betrachtung wird auch von Treichel et al. belegt, indem sie auf Basis einer theoretischen Analyse identifizieren, dass die Kontaktierung von vorgelagerten Prozessschritten beeinflusst wird [197].

Für den laserbasierten Lackabtrag sowie das Laserstrahlschweißen bei flachleiterbasierten Formspulenwicklungen wurden noch keine umfassenden wissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt. Daher ist es das Ziel der vorliegenden Dissertation, den Einsatz laserbasierter Prozesstechnologien zur Kontaktierung von Formspulenwicklungen grundlegend zu analysieren. Dabei sind insbesondere Abhängigkeiten des Fügeprozesses von der Herstellungskette für offene Formspulenwicklungen zu ermitteln. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die folgenden Forschungsfragen beantwortet:

- 1. Wie kann der Isolationslack reproduzierbar mittels Lasertechnologien vom zu fügenden Leiterbereich abgetragen werden?
- 2. Welche wechselseitigen Beziehungen gibt es zwischen den Prozessgrößen, der Werkstückbeschaffenheit und den erzielbaren Kontaktstelleneigenschaften beim Schweißen mit infraroten Lasern?
- 3. Welche Wechselwirkungen entlang der Prozesskette beeinflussen den laserbasierten Kontaktierungsprozess und wie kann mit deren Kenntnis die Prozessstreuung reduziert werden?

Um die Forschungsfragen zu beantworten wird die folgende Vorgehensweise gewählt, an welcher sich auch die Gliederung der Dissertation orientiert:

- 1. Die Prozesskette zur Herstellung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen wird in Kapitel 3 mit dem Ziel analysiert, relevante Wechselbeziehungen mit dem Prozessschritt der Kontaktierung zu identifizieren.
- 2. In Kapitel 4 erfolgt die Untersuchung des laserbasierten Abtrags der Lackisolation von Leitern mit rechteckiger Querschnittsgeometrie sowie der technologische Vergleich mit Alternativprozessen.
- 3. In den praktischen Untersuchungen des Kapitels 5 wird ein umfassendes Prozessverständnis zum Schweißen von Formspulenwicklungen mittels infraroter Laserstrahlung geschaffen.

- 4. Basierend auf diesen Untersuchungen erfolgt in Kapitel 6 die Ableitung eines optimierten Parametersatzes und ein Benchmark mit etablierten Fügetechnologien.
- 5. Der Einfluss prozesskettenbedingter Schwankungen auf den Schweißprozess wird in Kapitel 7.1 quantifiziert und deren Auswirkung auf die Schweißqualität analysiert.
- 6. Im abschließenden Kapitel 7.2 werden auf Grundlage einer Systematisierung der prozesskettenübergreifenden Wirkbeziehungen Maßnahmen zur Reduktion der Prozessstreuung des Kontaktierungsprozesses abgeleitet.

Dabei wird insbesondere zur Prozessanalyse und Ableitung von Wechselbeziehungen auf Werkzeuge und Methoden des Six Sigma-Systems sowie der Statistik zurückgegriffen. Deren Einsatz ermöglicht die systematische Erarbeitung von Antworten auf die Forschungsfragen. Dies äußert sich insbesondere bei der Durchführung experimenteller Untersuchungen dadurch, dass bei reduzierten Versuchsaufwänden aussagefähige Versuchsergebnisse erzielt werden.

# 3 Kausalitäten beim Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen

Das Ergebnis von Fertigungsprozessen hängt von unterschiedlichsten Einflussgrößen ab, wobei zwischen den Eingangs- und Zielgrößen Ursache-Wirkungs-Beziehungen vorliegen. Eine Methodik zur grafischen Strukturierung dieser Abhängigkeiten stellt das Ishikawa-Diagramm dar, das es ermöglicht, auf der Makroebene Ursachen zu identifizieren, um diese detailliert zu analysieren. Dabei erfolgt eine Strukturierung nach den fünf Kategorien Milieu, Material, Maschine, Mensch sowie Methode. Die Ursache-Wirkungs-Analyse für das Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen mit rechteckigem Leiterquerschnitt stellt Bild 19 dar. Zusätzlich ist die Relevanz der Eingangsgrößen, die im Anschluss erläutert werden, für das weitere Vorgehen gekennzeichnet. [198]



Bild 19: Ursache-Wirkungs-Diagramm des Laserstrahlschweißens von Formspulenwicklungen

Für das Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen mit rechteckigem Leiterquerschnitt sind unter der Kategorie Milieu die schwer zu kontrollierenden Umgebungsbedingungen des Fügeprozesses zusammengefasst. Die zu erwartenden Temperaturschwankungen im Hinblick auf die Temperaturabhängigkeit des Absorptionsverhalten von Kupfer werden als gering eingeschätzt [167]. Außerdem kann in Recherchen nicht belegt werden, dass Metalldampf und Rauch den Schweißprozess von Kupfer beeinflussen. Dies gilt auch für Fremdpartikel in der bei Montageanlagen üblichen Konzentration sowie für atmosphärische Schwankungen.

Der Einfluss des Anlagenbedieners bzw. Einrichters wird in die Kategorie Mensch eingeordnet. Dieser bestimmt beim Einrichten der Spann- und Aufnahmevorrichtung im Bezug zur Optik den Fokusabstand sowie die Ausrichtung zwischen dem Werkstück und der Bahn des Laserstrahls. Bei manuellen Handhabungs- oder Montagetätigkeiten besteht die Möglichkeit der Verschmutzung der Fügeflächen. Des Weiteren ist der Mitarbeiter für die Reinigung der Fokussieroptik verantwortlich, da bei Verschmutzungen die Gefahr von Fokusverschiebungen und Anlagenschäden besteht. Vor dem Hintergrund einer anzustrebenden Vollautomatisierung und da moderne Fokussieroptiken eine Überwachung der Schutzglasverschmutzung aufweisen, werden diese beiden Einflussgrößen vernachlässigt.

Relevante Werkstückeigenschaften sind unter Material zusammengefasst. Dazu gehören das Vorhandensein von Isolationsresten im Fügebereich sowie der Oxidationszustand und die Rauheit der Fläche, die zur Energieeinkopplung genutzt wird [P12; 166]. Wegen des starken Einflusses der Wärmeleitung auf den Prozess sind verschiedene Leitergeometrien einzubeziehen [9]. Weil nach aktuellem Kenntnisstand zur Herstellung von Wicklungen vornehmlich der Werkstoff Kupfer-ETP Anwendung findet, erfolgt in den Untersuchungen eine entsprechende Beschränkung. Da Eisenreich et al. in ihren Untersuchungen keinen Einfluss der Härte des eingesetzten Kupferwerkstoffes auf den Prozess identifizieren, wird diese in den Experimenten nicht berücksichtigt [105].

Als wesentliche Methode zur Beeinflussung des Fügeprozesses werden die Kombination aus Laserleistung P<sub>L</sub> und Vorschubgeschwindigkeit f identifiziert [164]. Gleiches gilt für die vom Spannvorgang beeinflusste Positionierung der Leiter zueinander, welche die Schweißmöglichkeit bestimmt [117]. Strategien zur Leistungsmodulation werden als wesentliche Maßnahmen zur Reduktion von Auswürfen und Schweißspritzern gesehen, ebenso wie der Einsatz von Prozessgasen [185; 190]. Da der Absorptionsgrad vom Einfallswinkel abhängt, ist dieser in der weiteren Ausarbeitung zu berücksichtigen [177]. Zusätzlich wird erwartet, dass Leistungsrampen am Ende der Naht Fehler reduzieren und dass die Wahl der Geometrie der Schweißbahn den Prozess beeinflusst [199].

Durch die Festlegung auf infrarote Dauerstrichlaser in Kapitel 2.4.3 wird die Wellenlänge  $\lambda$  im Bereich von 1000 nm in der Kategorie Maschine als gegeben angesehen. Da für Fügeaufgaben meist zirkular polarisierte Laser

eingesetzt werden und diese durch die Verfügbarkeit von Systemen zur Leistungsregelung eine hohe Leistungsstabilität aufweisen, sind diese Aspekte nicht weiter zu berücksichtigen. Hingegen besitzen das Intensitätsprofil sowie der Brennfleckdurchmesser d<sub>B</sub> einen maßgeblichen Einfluss auf den Strahlparameterquotienten und somit den Übergang zwischen Wärmeleitungs- und Tiefschweißen. Da die Beugungsmaßzahl M<sup>2</sup> den bereits adressierten Brennfleckdurchmesser beeinflusst, wird diese im weiteren Vorgehen nicht berücksichtigt. [161]

# 3.1 Prozessketten zur serientauglichen Herstellung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen

In Fertigungsketten werden die Eigenschaften von Werkstücken in aufeinanderfolgenden Schritten beeinflusst, wobei ein Merkmal von einer Kombination mehrere Herstellungsprozesse abhängen kann. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass das Ergebnis eines Fertigungsschritts von einer Merkmalsausprägung abhängt, die durch vorgelagerte Schritte beeinflusst wird. Für den Prozess des Schweißens flachleiterbasierter offener Formspulenwicklungen mittels infraroter Laser werden neben der Abhängigkeit von den Halbzeugeigenschaften insbesondere derartige Wirkbeziehungen mit vorgelagerten Fertigungsschritten innerhalb der Prozesskette erwartet [P12]. Um diese aufdecken zu können, wird die stark vereinfachte Prozesskette aus Bild 8 in den Prozessablauf einer exemplarischen Wicklungsherstellung mit offenen Formspulen überführt, wobei technologische Alternativen denkbar sind. Hierfür wird der in [P2] vorgestellte Ablauf weiter detailliert. Der sich ergebende exemplarische Prozessablauf der aufeinanderfolgenden Fertigungsschritte wird in Bild 20 gezeigt und im Folgenden erläutert. Um alle wesentlichen Aspekte der Fertigungskette strukturiert dokumentieren zu können, werden zusätzlich für jeden Prozessschritt die wesentlichen Eingangsfaktoren und Ausgabegrößen ange-Hierbei erfolgt eine Kennzeichnung nach Material (M). führt. kontrollierbarer Größe (K), Störgröße (S) sowie Information (I).

Nach Bereitstellung des Kupferlackdrahtes rechteckigem Querschnitts in Form von Drahtcoils auf Spulen sind unsymmetrische Restspannungen, die zu einer Krümmung führen, abzubauen, was in einem Walzrichtprozess durch mehrfaches elastisch-plastisches Biegen in entgegengesetzte Richtungen erfolgt [200]. Von diesem gerichteten Draht wird im Anschluss in definierten Bereichen die Lackisolation abgetragen, wofür Laserverfahren große Potenziale zeigen. In der Mitte eines abisolierten Bereichs wird mittels Prägen eine umlaufende Kerbe erzeugt, bevor der Leiter in diesem Bereich im Scherschneidverfahren getrennt wird. Das Ergebnis sind Leiterstücke definierter Länge, die einen Bereich ohne Lackisolation und eine Fase an den Enden aufweisen. Diese dienen im späteren Montageprozess als Einführhilfe. [P2]

	Eingangsgrößen	Ausgabegrößen	Ergebnis Prozessschritt	
Draht richten	M Lackdraht K Drahtzugkraft K Abstände Richtwalzen S Abw. Leitergeometrie S Abw. Isolationsschicht S Verschleiß Richtwalzen	M Lackdraht gerichtet S Geradheitsabweichungen S Deformation Leiterquerschnitt S Isolationsschäden		
lsolationslack abtragen	M Lackdraht gerichtet K Prozessablauf & -parameter S Abw. Isolationsschicht S Abw. Isolationsmaterial S Abw. Positionierung	M partiell abisolierter Lackdraht S Isolationsreste S Oxidation Oberfläche S Isolationsschäden		
Einführfase herstellen und Leiter trennen	M partiell abisolierter Draht K Prozessablauf & -parameter S Werkzeugverschleiß	M abgelängter Lackdraht S Oberflächenrauheit S Schnittgrat S Deformation Leiterquerschnitt S Längenabweichungen S Abweichungen Fase I Kraft-Weg-Überwachung		
Formgebung offene Formspulen	M abgelängter Lackdraht K Prozessablauf & -parameter S Werkzeugverschleiß S Abw. Drahtgeometrie S Rückfederung	M offene Formspule S Geometrieabweichungen S Isolationsschäden S Deformation Leiterquerschnitt I Kraft-Weg-Überwachung		
Formspulen puffern und vereinzeln	M offene Formspulen K Länge Staustrecke	M offene Formspulen S Oxidation Oberfläche S Isolationsschäden I Füllstand		
Formspulen vormontieren	M offene Formspulen K Prozessablauf & -parameter S Abw. Geometrie	M Vormontagebaugruppen S Deformation Formspulen S Isolationsschäden		
Vormontage- baugruppen in Blechpaket einsetzen	M Vormontagebaugruppe M nutgrundisoliertes Blechpaket K Prozessablauf & -parameter S Abw. Blechpaket S Abw. Vormontagebaugrupper S Abw. Einführfase	<ul> <li>M bestücktes Blechpaket</li> <li>S Deformation Formspulen</li> <li>S Isolationsschäden</li> <li>S Lageabweichungen</li> <li>S Schäden Nutgrundisolation</li> <li>I Kraft-Weg-Überwachung</li> </ul>		
Formspulenenden radial biegen	M bestücktes Blechpaket K Prozessablauf & -parameter S Lageabweichungen S Rückfederung S Werkzeugverschleiß	M radial gebogene Formspulen S Deformation Leiterquerschnitt S Isolationsschäden S Lageabweichungen S Schäden Nutgrundisolation I Kraft-Weg-Überwachung		

#### 3.1 Prozessketten zur serientauglichen Herstellung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen

	Eingangsgrößen	Ausgabegrößen		Ergebnis Prozessschritt	
Formspulenenden schränken	M radial gebogene Formspulen K Prozessablauf & -parameter S Lageabweichungen S Rückfederung S Werkzeugverschleiß	M geschrä S Deforma S Isolation S Lageab S Schäde I Kraft-W	inkte Formspulen ation Leiterquerschnitt nsschäden weichungen m Nutgrundisolation 'eg-Überwachung		
Formspulenenden kontaktieren	M geschränkte Formspulenender K Spannprozess K Prozessablauf & -parameter S Isolationsrückstände S Oxidation Einkoppelfläche S Rauheit Einkoppelfläche S Positionsabweichungen S Abw. Leitergeometrie	n M kontakti S Abw. Ei S Auswür S Abw. Fi S Schmau S Isolation	ierte Formspulenender inschweißtiefe fe und Spritzer Igegeometrie Jch nsschäden		
Sonderelemente montieren und verbinden	M geschränkte Formspulenende M Sonderelemente K Spannprozess K Prozessablauf & -parameter I Isolationsrückstände S Oxidation Einkoppelfläche S Rauheit Einkoppelfläche S Positionsabweichungen S Abw. Leitergeometrie	M kontakti S Abw. Ei S Auswür S Abw. Fi S Schmau S Isolation	ierte Wicklung nschweißtiefe fe und Spritzer Jgegeometrie Jch nsschäden		
Kontaktstellen isolieren	M kontaktierter Stator I Isolationsmaterial K Prozessablauf & -parameter S Abw. Kontaktstellengeometrie S Abw. Oberflächenzustand	M isolierte S Unregel S Verunre I Prozess	: Kontaktstellen Imäßigkeiten Isolation inigungen sdaten		
Hochspannungs- und Widerstands- messung	M Wicklung mit isolierten Kontaktstellen K Prüfabläufe S Temperatur S Luftfeuchtigkeit	M geprüfte I Wicklun I Spannu	∋ Wicklung ıgswiderstand ngsfestigkeit		
Stator imprägnieren	M geprüfter Stator mit Wicklung M Imprägnierungsmaterial K Prozessablauf & -parameter S Abw. Baugruppengeometrie S Abw. Oberflächenzustand	M fertiger S Unregel S Verunre I Prozess	Stator Imäßigkeiten Isolation inigungen sdaten		200 C
	Abw.: Abweichung M: Materia	K: kon	trollierbare Größe	S: Störgröße	I: Information

Bild 20: Erweiterter Prozessablauf der Herstellung offener Formspulenwicklungen (in Anlehnung an: [P2; P15])

Aus den Leiterelementen werden im Anschluss durch ein mehrstufiges Umformen offene Formspulen hergestellt. Zunächst erfolgt im Schritt des U-Biegens die Herstellung der zweidimensionalen Geometrie aus Spulenkopf und parallelen Schenkeln. Der Spulenkopf besteht hierbei aus dem Spulenauge und zwei Schrägen. Zwischen den Bereichen der Formspule befinden sich definierte Übergangsradien. Für diesen Schritt bietet sich der Einsatz des Dreipunktbiegeverfahrens an. Da die Formspulen in der Regel Lagensprünge realisieren und der Kreisform des Stators folgen müssen, erfolgt im Anschluss ein Biegen des Spulenkopfes in der dritten Raumrichtung. Hierdurch werden die Schenkel auf zwei verschiedene Ebenen gebracht und verdreht, sodass diese im Nutbereich in tangentialer Richtung zum Statordurchmesser verlaufen. Die komplexen dreidimensionalen Geometrien des Spulenkopfes werden z.B. in einem Gesenkbiegeverfahren realisiert. Alternativ kann die komplette Geometrie in einem Rotationszugbiegeverfahren hergestellt werden [201]. [P2]

Nach dem Puffern der benötigten Formspulenvarianten werden diese bei komplexen Wicklungen durch Roboter zu einer oder mehreren Vormontagebaugruppen, den Formspulen-Körben, zusammengeführt. Diese werden im Anschluss axial in das bereits mit Nutgrundisolationen versehene Blechpaket eingeschoben. Um bei Mehrschichtwicklungen zwischen den Formspulenenden unterschiedlicher Schichten einen ausreichenden Abstand herzustellen, erfolgt zunächst ein Biegen der freien Enden in radialer Richtung. Im Anschluss werden zu verbindende Formspulenenden im Schränkprozess so in gegengesetzter Richtung geschränkt, dass diese nebeneinanderliegen. [P2]

Dies ermöglicht den darauffolgenden Prozessschritt der Kontaktierung, in dem die freien Enden gespannt und im Verfahren des Laserstrahlschweißens elektrisch und mechanisch miteinander verbunden werden [P1]. Zur Vervollständigung der Wicklung sind im Anschluss die Phasenausleitungen und Sonderelemente zu montieren und kontaktieren [197]. Diese sind in Abhängigkeit vom Wickelschema ggf. zum Schalten oder zur Realisierung von Nutsprüngen, die nicht im Schränkprozess abgebildet werden können, notwendig.

Da im Bereich der Kontaktierung die Lackisolation der Leiter abgetragen wurde, müssen diese Stellen im Nachgang isoliert werden, wozu flüssige oder pulverförmige Isolationsmaterialen aufzutragen sind. Um sicherzustellen, dass der hergestellte Stator den elektrischen Anforderungen genügt, wird im Anschluss z.B. der Wicklungswiderstand ermittelt und die Spannungsfestigkeit getestet, wobei auf die Normenreihe DIN EN 60034 zu verweisen ist. Zum Abschluss der Prozesskette wird der komplette Stator imprägniert oder vergossen, wozu unterschiedliche Prozesstechnologien, wie z.B. das Träufelverfahren, Einsatz finden können. [P2; 202]

# 3.2 Wechselwirkungen laserbasierter Kontaktierungstechnologien entlang der Prozesskette

Die im Prozessablauf in Bild 20 gesammelten 14 Fertigungsschritte zur Herstellung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen zeigen, dass unterschiedlichste Prozesstechnologien Anwendung finden. Außerdem wird deutlich, dass jeder Einzelschritt der Prozesskette von vielfältigen Eingabegrößen beeinflusst wird, die sich auf die Ausgabegrößen auswirken. Zur Einschränkung des Betrachtungsraums für den im Zentrum stehenden laserbasierten Kontaktierungsprozess wird auf Basis der in Bild 19 ermittelten Wirkbeziehungen sowie den in Bild 20 dokumentierten Ausgabegrößen der vorgelagerten Prozesschritte eine SIPOC-Analyse durchgeführt. Dafür werden die Eingabe- (Input, I) und Ausgabegrößen (Output, O) des betrachteten Prozesses (Process, P) gesammelt und die beeinflussenden vorgelagerten Schritte (Supplier, S) sowie abhängigen nachgelagerten Schritte (Customer, C) zugeordnet, wie Bild 21 zusammenfasst.



Bild 21: SIPOC-Analyse des Laserstrahlschweißens offener Formspulenwicklungen

Die aus dem Schweißprozess resultierende Geometrie der Fügestelle wirkt sich auf den nachgelagerten Isolierprozess der Kontaktstellen aus, wobei unregelmäßige Nahtgeometrien und scharfe Kanten den Prozess erschweren [202]. Dies gilt auch für die Entstehung von Schmauch, der das Anhaften der Werkstoffe zur Kontaktstellenisolation und Imprägnierung negativ beeinflusst. Auch am Stator erstarrte Auswürfe und Schweißspritzer können das Benetzungsverhalten im Rahmen der Imprägnierung stören. Zusätzlich steigert die Entstehung großer kugelförmiger Kontaktstellengeometrien, die über die Außenabmessungen der Leiter ragen, die Gefahr eines Kurzschlusses durch die Verringerung der Luft- und Kriechstrecken. Ebenfalls im Rahmen der Hochspannungsprüfung werden Schäden an der Isolation detektiert. Diese können aus einem zu hohen Wärmeeintrag oder Auswürfen und Schweißspritzern, die auf der Wicklung zum Liegen kommen, resultieren. Die Bildung von Poren in der Schweißnaht und geringe Einschweißtiefen reduzieren den leitenden Querschnitt der Naht. Folglich steigt der Widerstand der Kontaktstelle, was zu zusätzlichen Verlusten und bei hohen Strömen zu einer thermischen Schädigung der Wicklung führen kann.

Die den Fügeprozess bestimmenden Eingangsgrößen werden maßgeblich von vorgelagerten Prozessschritten beeinflusst, wie aus Bild 21 abgeleitet werden kann. So bestimmt die Qualität des Abtragsprozesses der Isolation, ob verbrennende Isolationsreste Auswürfe verursachen. Der Absorptionskoeffizient α wird neben den Werkstoffeigenschaften auch von der Beschaffenheit der Einkoppelfläche in Form der Rauheit und des Oxidationszustands bestimmt [166]. Während der Oxidationszustand neben der im Lackabtragsprozess eingetragenen Wärmeenergie auch von der Durchlaufzeit zwischen Lackabtrag und Kontaktierung abhängt, resultiert die Oberflächenrauheit aus dem Prozess des Trennens des Leitermaterials. Die für die Ausbildung der Schweißnaht maßgebliche Positionierung der zu verbindenden Leiterenden zueinander wird durch das Spannen der Formspulenenden unmittelbar im Fügeprozess beeinflusst. Zusätzlich hängt diese von der Geometriegenauigkeit der Formspulen und deren Montage in das Blechpaket ab. Folglich wirken sich an dieser Stelle das Richten des Drahtes, die Formgebung sowie das radiale Biegen und Schränken aus, da diese Prozessschritte die Maßhaltigkeit der Formspulen direkt beeinflussen. Auch die Position der Formspulen im Blechpaket bestimmt über die Maßkette die Lage der zu verbindenden Formspulenenden zueinander, weswegen die Vormontage sowie das Einschieben der Formspulen-Körbe diese Eingabegröße des Schweißprozesses bestimmen. Die Abmessung und Form des Leiterquerschnitts im Fügebereich wirkt sich auf die Fugengeometrie, Schmelzbadausbildung sowie Wärmeleitung aus und wird primär vom angelieferten Ausgangsmaterial bestimmt. Allerdings kann das Überschreiten der Fließgrenze beim Richten und Trennen zu einer ungewollten Verformung des Leiterquerschnitts führen. Hingegen besteht beim radialen Biegen und Schränken die Gefahr, dass punktuell vom Werkzeug hervorgerufene hohe Kräfte eine Beschädigung der Leiterenden zur Folge haben. Neben dem Leiterquerschnitt beeinflusst auch die im Rahmen des Trennprozesses hergestellte Einführfase die Fugengeometrie. Hier wird erwartet, dass zusätzliches Material aufgeschmolzen werden muss, um den Spalt im Bereich der Einführfase zu füllen.

Aus Bild 19 wird sichtbar, dass auch nicht aus der Prozesskette resultierende Größen den Fügeprozess beeinflussen. Hier sind der maschinenabhängige Fokusdurchmesser sowie die Intensitätsverteilung anzuführen. Außerdem spielen die Prozessgrößen des Vorschubs und der Laserleistung, das eingesetzte Prozessgas und die Leistungsmodulation sowie Leistungsrampen bei der Ausbildung des Schmelzbads eine wichtige Rolle. Dies gilt auch für den Einfallswinkel und die gewählte Schweißbahn sowie die vom Spannprozess beeinflusste Positionierung der Werkstücke zueinander.

# 3.3 Ermittlung und Darstellung prozessübergreifender Abhängigkeiten

Aus den vorangegangenen Kapiteln wird sichtbar, dass eine Vielzahl an Prozessschritten der Fertigungskette zur Herstellung flachleiterbasierter offener Formspulenwicklungen die Kontaktstelleneigenschaften beeinflussen. Dies beruht darauf, dass die Prozesse Ausgabegrößen determinieren, die Eingangsgrößen für den laserbasierten Kontaktierungsprozess darstellen. Zur Quantifizierung dieser prozesskettenübergreifenden Abhängigkeiten sind gegenwärtig keine standardisierten Vorgehensweisen bekannt, weswegen hierfür eine zweiteilige Methodik konzipiert wird.

Neben kontrollierbaren Einflussgrößen unterliegen Fertigungsprozesse auch schwer kontrollierbaren Faktoren, weswegen deren Ergebnis nicht genau und unendlich oft reproduziert werden kann. Basierend hierauf weisen Merkmalsausprägungen von Werkstücken Streuungen auf. Insbesondere bei der Betrachtung von Prozessketten kann diese Streuung der Ausgabegröße eine Schwankung der Eingangsgröße eines nachgelagerten Prozesses bedeuten. [203]

In einem Prozess wird die Gesamtheit der Ausprägungen der Eingangsgrößen sowie Störgrößen in Ausgabegrößen übersetzt. Hierbei haben die Eingangsfaktoren einen unterschiedlich starken Einfluss auf die resultierenden Merkmalsausprägungen, was durch Effekte beschrieben werden kann. Da die relevanten Merkmalsausprägungen der Eingangsgröße nicht als diskrete Werte, sondern als Verteilung betrachtet werden müssen, ergibt sich, dass diese Streuung verknüpft über den Effekt des Merkmals eine Streuung der Ausgangsgrößen nach sich zieht. Hierbei kann sich die resultierende Verteilung des Prozessergebnisses aus einer Vielzahl dieser beschriebenen Kausalketten sowie der Streuung des unbeeinflussten Prozesses selbst zusammensetzen, wie Bild 22 verdeutlicht.



Bild 22: Darstellung prozesskettenübergreifender Einflüsse von Streuungen

Zur Bewertung von Fertigungsprozessen in Bezug auf die Streuung ist es gängige Praxis den Prozessfähigkeitsindex C<sub>p</sub> zu bestimmen. Dieser Kennwert beschreibt, welchen Anteil einer zugehörigen Toleranzbreite  $\Delta_T$  eine Prozessstreubreite  $\Delta_P$  einnimmt. Hierbei berechnet sich die Toleranzbreite  $\Delta_T$  als die Differenz zwischen der oberen Spezifikationsgrenze OSG und der unteren Spezifikationsgrenze USG. Wenn zusätzlich die Prozesslage beurteilt werden soll, wird der minimale Prozessfähigkeitsindex C<sub>pk</sub> herangezogen, bei dem auch der minimale Abstand des Mittelpunkts der Verteilung X<sub>mid</sub> von den Spezifikationsgrenzen berücksichtigt wird. Durch die Einbeziehung der festgelegten Spezifikationsgrenzen in die Berechnung der Werte müssen diese festgelegt sein. Darüber hinaus wird die Streuung auf diese Weise nicht direkt verkörpert. [203; 204]

Zur Beschreibung der Streubreite der Eingangsgrößen  $\Delta_E$  des laserbasierten Kontaktierungsprozesses flachleiterbasierter Formspulenwicklungen muss diese quantifiziert werden. Dabei kann die Streuung der Eingangsgröße  $\Delta_{\rm E}$ vom Ergebnis eines vorausgehenden Prozessschrittes abhängen. Bei normalverteilten Daten wird die Streubreite  $\Delta_N$  allgemein als die sechsfache Standardabweichung  $\sigma$  berechnet [203]. Um die Allgemeingültigkeit des konzipierten Ansatzes sicherzustellen, darf allerdings keine Beschränkung auf normalverteilte Daten erfolgen. Daher kann zur Erfassung der Streubreite der Eingangsgrößen  $\Delta_{\rm E}$  des laserbasierten Kontaktierungsprozesses in Anlehnung an die Definition über sechs  $\sigma$  für normalverteilte Daten der Abstand zwischen dem 99,865 %-Quantil X99,865 % und dem 0,135 %-Quantil X<sub>0.135 %</sub> herangezogen werden, deren Bestimmung allerdings die Verfügbarkeit sehr großer Stichprobenumfänge voraussetzt [204]. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Erfassung unabhängig von der Verteilungsform. Da im Rahmen dieser Ausarbeitung keine ausreichend großen Datensätze zur Verfügung stehen, wird die Streubreite der Eingangsgrößen des Laserstrahlschweißprozesses  $\Delta_E$  im Folgenden nach Gleichung 2 aus dem Intervall zwischen dem 16 %-Quantil X<sub>16 %</sub> und dem 84 %-Quantil X<sub>84 %</sub>
repräsentiert. Für normalverteilte Messwerte entspricht dieses Intervall  $\pm \sigma$  und umfasst ca. 68 % der zugrundeliegenden Daten [205].

$$\Delta_E = X_{84\%} - X_{16\%}$$
 [204] (2)

Eine gängige Methode zur quantitativen Beschreibung von Wirkzusammenhängen stellt die Ermittlung dimensionsloser Effekte im Bereich der statistischen Versuchsplanung dar. Hierbei wird eine Eingangsgröße, der Faktor, systematisch zwischen Einstellungen variiert und mittels Differenzbildung aus den beiden Ergebnismittelwerten die Auswirkung auf die Zielgröße ermittelt. Ein Nachteil der Vorgehensweise ist, dass die Streuung der Eingangsgrößen in der Berechnung nicht berücksichtigt wird und diese auf diskrete Werte eingestellt werden müssen. Da Effekte stets lineare Abhängigkeiten annehmen, können diese alternativ als Koeffizient b einer Regressionsgeraden bestimmt werden. Diese statistische Methode ermöglicht die Aufstellung eines mathematischen Modells für Abhängigkeiten zwischen einer Eingangs- und Ausgabegröße. Dabei wird die Gleichung so bestimmt, dass die aufsummierten Abweichungsquadrate zwischen den mit der Regressionsgleichung berechneten und den zugrundeliegenden Werten minimal werden. [206; 207]

Bartlett entwickelt eine Methode zur Berechnung von Regressionsgeraden bei Datensätzen, in denen sowohl die x- als auch y-Werte Messfehlern unterliegen. Dafür werden die  $n_B$  Wertepaare auf Basis der x-Werte in drei sich nicht überlappende Gruppen unterteilt. Die erste und dritte Gruppe soll dabei jeweils genau aus  $k_B$  Wertepaaren bestehen, wobei  $k_B$  möglichst  $n_B/3$  entsprechen soll. Im Anschluss werden für die erste und dritte Gruppe jeweils die Mittelwerte der x- und y-Werte bestimmt und nach Gleichung 3 der Regressionskoeffizient  $b_B$  errechnet. [208]

$$b_{B} = \frac{\bar{y}_{3} - \bar{y}_{1}}{\bar{x}_{3} - \bar{x}_{1}}$$
 [205] (3)

Auf Grundlage der beiden erläuterten Größen wird die Kennzahl des prozesskettenbedingten Streuanteils  $\xi$  entwickelt. Diese in Gleichung 4 angegebene Kennzahl ermöglicht die Quantifizierung prozesskettenübergreifender Abhängigkeiten. Vorgelagerte Prozessschritte determinieren die Eingangsgrößen des laserbasierten Kontaktierungsprozesses. Auf dieser Grundlage gleicht die Prozessstreuung  $\Delta_P$  eines vorausgehenden Prozessschritts, die die Schwankung des resultierenden Merkmals repräsentiert, der Streubreite einer entsprechenden Eingangsgröße des Kontaktierungsprozesses  $\Delta_E$ . Da für die betrachtete Eingangsgröße  $\Delta_E$  neben deren Streubreite auch ihre Wirkung auf die Ausgangsgröße zu berücksichtigen ist, werden Effekt und Streubreite multipliziert. Dabei wird der Effekt durch den Betrag der Steigung  $b_B$  einer nach Bartlett durchgeführten linearen Regression ausgedrückt, damit die Kennzahl unabhängig vom Vorzeichen des Effektes bleibt.

$$\xi = \Delta_E \times |b_B| = (X_{84\%} - X_{16\%}) \times \left| \frac{\overline{y}_3 - \overline{y}_1}{\overline{x}_3 - \overline{x}_1} \right|$$
(4)

Der prozesskettenbedingte Streuanteil  $\xi$  ermöglicht den Vergleich übergreifender Abhängigkeiten. Er kann unabhängig von der Verteilungsform der Eingangsgröße ermittelt werden, wobei sowohl die Eingangs- als auch Ausgangsgrößen fehlerbehaftet sein können und eine Einstellung auf diskrete Werte nicht notwendig ist. Die Vorgehensweise wird in Bild 23 zusammenfassend verdeutlicht.



Bild 23: Quantifizierung prozesskettenübergreifender Einflussgrößen auf die laserbasierte Kontaktierung von Formspulenwicklungen

# 4 Abtrag der Isolation von Kupferlackdrähten für Formspulenwicklungen

Zur Realisierung elektrisch leitfähiger Verbindungen ist es in Abhängigkeit der ausgewählten Verbindungstechnologie notwendig, die Lackisolation in einem vorgelagerten Prozess abzutragen [7]. Neben Schmelzschweißverfahren gilt dies für Pressschweißverfahren und mechanische Kontaktierungsprozesse, wobei unterschiedliche Gründe anzuführen sind. Bei Pressschweißverfahren unterbindet die Isolation den zur elektrischen Verbindungsausbildung notwendigen rein metallischen Kontakt. Dies äußert sich z.B. beim Widerstandspressschweißen darin, dass der Stromfluss zwischen den Elektroden blockiert wird. Auch bei mechanischen Fügeprozessen, wie z.B. Crimpverfahren, muss die Isolation entfernt werden, um einen elektrischen Kontakt zu realisieren. Erfolgt hingegen das Fügen der Leiter im Prozess des Laserstrahlschweißens wird ein Schmelzbad ausgebildet. Durch die damit einhergehenden, hohen Temperaturen verbrennt das Isolationsmaterial und die Verbrennungsgase können starke Schmelzeauswürfe hervorrufen. Aus diesem Grund ist ein rückstandsloser Abtrag des Isolationsmaterials zur Realisierung eines stabilen Schweißprozesses unerlässlich. [113; P1]

Zusammen mit den in Kapitel 2.3 abgeleiteten Anforderung ergeben sich für die Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen folgende Eigenschaften, die ein geeignetes Abtragsverfahren auszeichnen. Zur Vermeidung von Schweißspritzern muss reproduzierbar ein rückstandsfreier Lackabtrag, insbesondere auch im Bereich der Kantenradien, umgesetzt werden. Dabei darf kein Leitermaterial abgetragen werden, um den Querschnitt nicht zu verjüngen und den Fügespalt nicht zu vergrößern. Wegen der hohen Anzahl abzuisolierender Leiterbereiche ist es eine zusätzliche Voraussetzung, dass das eingesetzte Verfahren eine hohe Flächenleistung aufweist. Da die Kontaktstelle selbst und darüber hinaus von der Isolation befreite Leiterbereiche im Nachgang wieder zu isolieren sind, muss ein definierter Übergang ohne lose anhaftende Isolationsreste zwischen dem isolierten und abisolierten Bereich erzielt werden. [209; P14]

Es lässt sich ableiten, dass es vorteilhaft ist, die Isolation auf einer möglichst kurzen Länge zu entfernen. Für den betrachteten Laserstrahlschweißprozess kann somit aus der sich während des Fügeprozesses im Leiter ausbildenden Temperaturverteilung die von der Isolation zu befreiende Länge abgeleitet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in isolierten Bereichen keine Temperaturen auftreten, die eine Schädigung der Isolation zur Folge haben. Zur Bestimmung der Maximaltemperatur ist der Temperaturindex der Isolation nicht geeignet, da dieser eine Dauergebrauchstemperatur angibt, wohingegen beim Kontaktierungsprozess die maximale Temperatur nur kurzzeitig auftritt. Daher wird empfohlen die Wärmeschocktemperatur  $\theta_s$  heranzuziehen. Diese gibt eine kurzzeitig zulässige erhöhte Temperaturbelastung an, bei der an bereits gebogenen Drähten keine Isolationsrisse zu erwarten sind. [75; 210]

# 4.1 Quantifizierung von Lackrückständen mittels Fluoreszenzmessung

Um den Lackabtrag von flachleiterbasierten Formspulen wissenschaftlich untersuchen und serienbegleitend überwachen zu können, ist die Erfassung des Prozessergebnisses essenziell. Allerdings sind für diese Anwendung gegenwärtig keine etablierten Analyseverfahren, die über die optische Beurteilung der abgetragenen Oberfläche hinausgehen, verfügbar.

Um in der Forschung aussagefähige Parameterstudien durchführen und für den Serieneinsatz Spezifikationsgrenzen für das Abtragsergebnis festlegen zu können, muss daher eine Möglichkeit zur messtechnischen Erfassung des Oberflächenzustands nach dem Abtragsprozess geschaffen werden. Dieser charakterisiert sich durch das Vorhandensein von Isolationsresten im untersuchten Leiterbereich. Auf Basis dieses Messwerts kann das Prozessergebnis sowie die Reproduzierbarkeit von Abtragsprozessen erfasst und verglichen sowie ein Zusammenhang zur Bildung von Auswürfen im Schweißprozess hergestellt werden. Als ein Messprinzip zur Erfassung dieser Größe wird die Fluoreszenzmessung identifiziert. [P1]

### 4.1.1 Messung der Fluoreszenz organischer Verbindungen

Emittiert ein Körper Energie in Form von Licht, wird dieses als Lumineszenzlicht bezeichnet, wobei die Quelle der abgegebenen Energie neben einer chemischen oder elektrischen Erregung auch in der Absorption von Lichtenergie liegen kann. Dieser Fall wird als Fotolumineszenz bezeichnet. Das emittierte Licht weist keine Vorzugsrichtung auf und besitzt eine spektrale Verteilung. In Abhängigkeit der Dauer des Abklingens der Emission nach Aussetzen der Anregung wird bei Dauern von unter 10<sup>-4</sup> s zwischen der Fluoreszenz und bei längeren Abklingdauern der Phosphoreszenz unterschieden. [211] In der Regel weist bei fluoreszierenden Stoffen die emittierte Strahlung eine größere Wellenlänge  $\lambda_{F, e}$  als die absorbierte Strahlung  $\lambda_{F, a}$  auf. Dies ist damit zu begründen, dass sich die Moleküle bei Raumtemperatur im Grundzustand befinden und durch die absorbierte Energie  $E_{F, a}$  ein Elektron in den angeregten Zustand springt. Für den angeregten Zustand vergrößert sich der Gleichgewichtsabstand zwischen den Atomkernen der Moleküle. Allerdings sind die Atomkerne des Moleküls nach dem Franck-Condon-Prinzip zu träge und diese Anpassung des Kernabstands kann nicht hinreichend schnell erfolgen, womit ein höheres Schwingungsniveau einhergeht. Vor der Emission der Fluoreszenzstrahlung wird Schwingungsenergie an die Umgebung abgegeben. Aus diesem Grund erfolgt der Rückfall des angeregten Elektrons in den Grundzustand bei einer kleineren Energiedifferenz  $E_{F, e}$ , woraus die längere Wellenlänge  $\lambda_{F, e}$  der Fluoreszenzstrahlung resultiert. [212]

In der Beschreibung der eingesetzten Isolationswerkstoffe in Kapitel 2.3.2 wird aufgelistet, dass vornehmlich Thermoplaste und Duromere als Werkstoff für Primärisolationen eingesetzt werden. Da die verwendeten Werkstoffe auf einem Kohlenstoffgerüst basieren, können diese den organischen Verbindungen zugeordnet werden [213]. Dabei haben organische Verbindungen gemeinsam, dass diese stark fluoreszieren, wenn sie ultravioletter Strahlung ausgesetzt sind [211; 214]. Daraus wird abgeleitet, dass Isolationsreste in einer Fluoreszenzmessung detektiert werden können.



Bild 24: Prinzip zur Detektion von Isolationsrückständen (in Anlehnung an: [214])

Bild 24 verdeutlicht, dass die Oberfläche beleuchtet und die emittierte Fluoreszenzstrahlung mittels eines Detektors erfasst wird. Die gemessene Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> wird in der Einheit RFU (Relative Fluorescence Unit) angegeben. Da diese Einheit nicht auf SI-Einheiten zurückgeführt werden kann, handelt es sich um eine Arbeitsgröße, wobei der Bezug durch den Einsatz von Fluoreszenznormalen hergestellt wird. Für die eingesetzten Normale resultiert aus einer festgelegten Anregung eine Fluoreszenzstrahlung definierter Intensität I<sub>F</sub>. Auf diese Weise kann eine lineare Justierung auf Grundlagen von zwei Fluoreszenznormalen mit der Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> von o RFU und 110 RFU erfolgen. Der Messung liegt eine gleichbleibende analysierte Fläche zugrunde, weil die anregende Strahlung eine vom Messsystem abhängige, definierte Ausdehnung des Messspots aufweist. Aus der gemessenen Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> kann ein Rückschluss auf Isolationsreste erfolgen, wobei größere Mengen des organischen Materials steigende Werte I<sub>F</sub> zur Folge haben. Dabei wird die Menge organischen Materials neben der Schichtstärke auch von der Verteilung bezogen auf die Fläche im analysierten Bereich beeinflusst. Hieraus folgt, dass das Messsystem bei der Ermittlung der Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> über die flächenbezogene Verteilung und Schichtstärke integriert, sodass die beiden Aspekte nicht einzeln erfasst werden können. [214; 215]

### 4.1.2 Qualifizierung der Fluoreszenzmessung zur Erfassung von Lackrückständen

Zur Validierung der These, dass die Abtragsqualität mit dem beschriebenen Messprinzip erfasst werden kann, wird eine dreistufige experimentelle Vorgehensweise konzipiert und abgearbeitet. Der in den Experimenten eingesetzte Messaufbau sowie die technischen Daten des Messsystems sind in Anhang 1 einsehbar. Als Probekörper kommt der in Anhang 2 spezifizierte lackisolierte Kupferdraht der Breite b<sub>L</sub> von 4,2 mm und der Höhe h<sub>L</sub> von 2,5 mm zum Einsatz, der eine Isolation des Grades 3 basierend auf dem Werkstoff PAI aufweist [216]. Der Isolationsgrad gibt einen geforderten Bereich der Isolationsschichtstärke h<sub>I</sub> an, wobei Grad 1 geringen und Grad 3 hohen Schichtstärken h<sub>I</sub> entspricht [217]. Die messtechnische Analyse des eingesetzten Drahtes ergibt, dass die Isolationsschichtstärke h<sub>I</sub> 93  $\mu$ m beträgt. [P14]

Zur Beurteilung der Eignung des Messprinzips wird zunächst mit Hilfe einer Korrelations- und Regressionsanalyse der Zusammenhang zwischen der gemessenen Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> und der Isolationsschichtstärke h<sub>I</sub> analysiert. Zur Herstellung der Probekörper durchlaufen diese für angepasste Zeitintervalle t<sub>c</sub> einen chemischen Abtragsprozess, wodurch unterschiedliche Isolationsschichtstärken h<sub>I</sub> realisiert werden. Hierfür kommt als Wirkmedium TechniStrip P1316 (MOS) des Herstellers MicroChemicals GmbH zum Einsatz, das auf 75 °C erwärmt wird. Im Anschluss erfolgt die Erfassung der Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub>, bevor in Schliffbildern die zugehörige verbleibende Schichtstärke h<sub>I</sub> der Isolation gemessen wird. [P14]

Um für den Anwendungsfall Einsatzbedingungen des Messsystems festlegen zu können, wird im Anschluss der Einfluss potenzieller Quellen für Messfehler beurteilt. Durch die Variation des Abstands a<sub>F</sub> zwischen Sensor und dem zu vermessenden Werkstück wird sowohl die bestrahlte Fläche und Bestrahlungsintensität, als auch der Abstand des Detektors von der Quelle der nicht gerichteten Fluoreszenzstrahlung variiert und somit eine Beeinflussung des Messergebnisses erwartet. Photochemische Prozesse begrenzen die Lebensdauer fluoreszierender Moleküle. Aus diesem Grund nimmt die Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> mit zunehmender Bestrahlungsdauer t<sub>Fl</sub> ab. Insbesondere bei mehrfacher Messung kann dieser als Fotobleaching bekannte Effekt das Messergebnis beeinflussen. [218]

Im dritten Schritt wird die Messunsicherheit bezogen auf den konkreten Anwendungsfall in einer R&R-Studie (Repeatability and Reproducibility) bewertet. Diese Vorgehensweise berücksichtigt die Messmittelstreuung in Form der Wiederholbarkeit sowie die vom Bediener verursachten Streuungen (Reproduzierbarkeit). Die so ermittelte Streuung des Messsystems wird auf eine Toleranz  $\Delta_T$  bzw. zu erwartende Prozessstreuung  $\Delta_P$  bezogen. Für Werte der Repeatability and Reproducibility im Bereich von 10 % oder darunter ist davon auszugehen, dass das Qualitätsmerkmal wegen einer niedrigen Messunsicherheit hinreichend genau beurteilt werden kann. Um die Einsetzbarkeit des Systems beurteilen zu können, werden zehn Proben unterschiedlicher Abtragsqualität von drei Prüfern je dreimal gemessen. [207]



Bild 25: Qualifikation der Fluoreszenzmessung zur Erfassung der Abtragsqualität von lackisolierten Kupferleitern (Messdaten: [P14; S3])

In Bild 25 werden die Vorgehensweise und Ergebnisse der Validierungsversuche für den Einsatz der Fluoreszenzmessung zur messtechnischen Erfassung von Isolationsresten zusammengefasst. Für den Zusammenhang zwischen der Isolationsschichtstärke h<sub>I</sub> und der Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> des untersuchten Systems wird ein quadratisches Modell bestimmt, welches 89,2 % der Streuung der Messwerte erklärt und somit eine hohe Güte aufweist. Folglich kann eine entsprechende mathematische Abhängigkeit angenommen werden. Es zeigt sich, dass der erwartete Effekt des Fotobleachings für die berücksichtigten Bestrahlungsdauern keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis hat, wohingegen es stark von schwankenden Messabständen aF abhängt. Aus diesem Grund wird im Folgenden bei der Verwendung stets eine geeignete Abstandslehre eingesetzt. In der abschließenden R&R-Studie zeigt sich, dass das Messmittel mit einer auf die Prozessstreuung  $\Delta_P$  bezogenen Streuung von 12 % leicht über dem empfohlenen Wert von 10 % liegt. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass das Messen an unterschiedlichen Stellen der Probenoberfläche eine Fehlerquelle darstellt, da eine homogene Verteilung der Isolationsreste vorausgesetzt wird. Bedingt durch die geringe Überschreitung wird das Messprinzip dennoch als fähig beurteilt. Zusammenfassend ist die Fluoreszenzmessung für die Untersuchungen dieser Dissertation geeignet und wird im weiteren Verlauf zur Erfassung der Abtragsqualität herangezogen.

# 4.2 Laserbasierter Abtrag des Isolationsmaterials von rechteckigen Kupferdrähten

Gepulste Laser finden bereits zum beschädigungsfreien Abtragen von Fremdschichten bei technischen Oberflächen Anwendung, woraus abgeleitet werden kann, dass diese Technologie auch Potenziale zum Abtrag der Isolation von lackisolierten Kupferleitern zeigt [219]. Um Kunststoffe von metallischen Oberflächen mittels Lasern abzutragen sind neben der Wellenlänge  $\lambda$  auch das abzutragende Material und die Schichtstärke h<sub>s</sub> zu berücksichtigen. Wenn der abzutragende Kunststoff eine hohe Schichtstärke  $h_s$  aufweist und die Strahlung der Wellenlänge  $\lambda$  zumindest teilweise absorbiert, resultiert daraus eine direkte Wechselwirkung des abzutragenden Materials mit der Laserstrahlung. Liegt hingegen eine dünne Kunststoffschicht vor, die für die Laserstrahlung der Wellenlänge  $\lambda$  transparent ist, und absorbiert das darunterliegende Metall die gepulste Laserstrahlung zumindest teilweise, führt dies zu einem alternativen Abtragsmechanismus. In Folge der Absorption am Metall entsteht ein Plasma, das ein zumindest teilweises Verdampfen der abzutragenden Schicht hervorruft. Crema et al. beschreiben, dass bei Epoxidharzschichten mit einer Schichtstärke hs im Bereich von 10 µm für Laserstrahlung der Wellenlänge  $\lambda$  von 532 nm der plasmabasierte Abtragsprozess hervorgerufen wird, während bei höheren Schichtstärken h<sub>s</sub> und Wellenlängen  $\lambda$  von 1064 nm ein direktes Verbrennen der Epoxidschicht erfolgt. Hingegen schildern Davies et al., dass Polyimid für Laserstrahlung der Wellenlänge  $\lambda$  von 1064 nm transparent ist und die Absorption im Kupfersubstrat eine Schockwelle hervorruft, die zur Delamination führt, in deren Folge die Beschichtung abplatzt [220]. In [221] wird beschrieben, dass Laserstrahlung der Wellenlänge  $\lambda$  von 10,6 µm in der Beschichtung absorbiert wird, im resultierenden Verbrennungsprozess allerdings eine Restschicht im Bereich von  $\frac{1}{4} \lambda$  zurückbleibt. Diese Wellenlängenabhängigkeit des Abtragsmechanismus bei lackisolierten Kupferleitern führt auch Spreng an, wobei er ableitet, dass die lokale Begrenzung des Wärmeeintrags als vorteilhaft zu bewerten ist [113]. [222]

### 4.2.1 Experimenteller Vergleich laserbasierter Abtragsprozesse für rechteckigen Kupferlackdraht

Um Lasertechnologien für den Abtrag der Isolation von rechteckigen Kupferleitern bewerten zu können, ist es notwendig das Prozessergebnis im Hinblick auf Isolationsreste und die Reproduzierbarkeit zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird mittels gepulst betriebener Laser mit variierenden Wellenlängen  $\lambda$ , mittleren Leistungen P<sub>L, m</sub> und Pulsdauern t<sub>p</sub> die Isolation des in Anhang 2 spezifizierten Leiters der Breite b<sub>L</sub> von 4,2 mm und Höhe h<sub>L</sub> von 2,5 mm abgetragen. Die in Schliffbildern ermittelte Isolationsschichtstärke h<sub>l</sub> beträgt ca. 93 µm. Die Proben sind unter einem Winkel von ca. 20° aufgespannt und werden von zwei Seiten bearbeitet, um einen umlaufenden Abtrag zu erreichen. In Tabelle 6 sind neben der optischen Analyse auch die von einem 3D-Laserscanning-Mikroskop ermittelte Oberflächenstruktur sowie die Fluoreszenzintensitäten und deren Streuung dargestellt. Die Analyseergebnisse beziehen sich auf einen Stichprobenumfang N von jeweils 20 Werkstücken, wobei die Fluoreszenz für jede Werkstückseite an vier verschiedenen Stellen gemessen wird.

Die Analyse der Aufnahmen und Messdaten belegt, dass beim Einsatz von CO<sub>2</sub>-Lasern keine Wechselwirkung mit dem Leiterwerkstoff erfolgt, da auf dem Laserscan der Oberfläche auch nach dem Abtragsprozess noch die feinen Riefen des Drahtzugs sichtbar sind. Im Übergangsbereich sind Verbrennungsreste und eine Ansammlung geschmolzenen Materials zu erkennen, was darauf schließen lässt, dass die Isolation im Prozess verbrannt wird. Dies kann auch durch eine Flammbildung beobachtet werden. Die Fluoreszenzmessung bestätigt, dass eine Isolationsschicht auf der

Oberfläche zurückbleibt, wodurch die Aussage von Davies et al. bestätigt wird [221].

Lasertechnologie	Oberflächengestalt	Fluoreszenzintensität I <sub>F</sub> in RFU		
Gaslaser CO <sub>2</sub> $\lambda = 10600 \text{ nm}$ $P_{L,m} \approx 10^{3} \text{ W}$ $t_{P} \approx 10^{5} \text{ ns}$	Isolation ——Ziehriefen	Front Seite Mittelwert	43,8 42,4 43,1	$\sigma = 10,8$ $\sigma = 12,8$ $\sigma = 11,9$
Faserlaser Nd:YAG $\lambda = 1064 \text{ nm}$ $P_{L, m} \approx 10^{1} \text{ W}$ $t_{P} \approx 10^{2} \text{ ns}$		Front Seite Mittelwert	151,7 158,0 154,8	σ = 74,1 σ = 79,8 σ = 77,0
Scheibenlaser Yb:YAG (cw) $\lambda = 1030 \text{ nm}$ $P_{L, m} \approx 10^2 \text{ W}$ $t_P \approx 10^5 \text{ ns}$		Front Seite Mittelwert	16,3 31,1 23,7	$\sigma = 6,5$ $\sigma = 13,1$ $\sigma = 12,7$
Scheibenlaser Yb:YAG $\lambda = 1030 \text{ nm}$ $P_{L, m} \approx 10^2 \text{ W}$ $t_P \approx 10^1 \text{ ns}$		Front Seite Mittelwert	9,5 7,4 8,5	$\sigma = 4,9$ $\sigma = 4,6$ $\sigma = 4,9$
kombiniert CO <sub>2</sub> & Nd:YAG λ = 10600/ 1030 nm PL, m $\approx$ 10 <sup>1</sup> / 10 <sup>2</sup> W t <sub>P</sub> $\approx$ 10 <sup>5</sup> / 10 <sup>2</sup> ns		Front Seite Mittelwert	2,0 8,5 5,3	$\sigma = 1,9$ $\sigma = 9,3$ $\sigma = 7,4$

Tabelle 6: Gegenüberstellung laserbasierter Verfahren zum Abtrag der Lackisolation<sup>1</sup> (Messdaten: [S3])

Für das Abisolieren mittels eines gepulsten Faserlasers ist eine Veränderung der Oberflächenstruktur des Leiters erkennbar. Die Annahme, dass keine Wechselwirkung mit dem Isolationsmaterial erfolgt, kann nur teilweise bestätigt werden, da sich im Übergangsbereich geringe Mengen an Verbrennungsrückständen identifizieren lassen. Aus dem Oberflächenprofil wird sichtbar, dass sich die Isolation auf der kompletten Probenbreite vom Leiter abhebt, was auf eine Delamination hindeutet. Des Weiteren werden im Prozess aufsteigende Partikel beobachtet, was auf ein Abplatzen der Isolation zurückzuführen ist. Aus den Ergebnissen wird abgeleitet, dass für den eingesetzten Faserlaser sowohl ein Verbrennen der Isolation als auch ein mechanischer Abtrag in Folge einer Delamination auftritt.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Der Autor dankt den Unternehmen Spectrum Technologies Ltd und Otto Bihler Maschinenfabrik GmbH & Co. KG für die Bereitstellung von Versuchsteilen.

Starke Verbrennungsreste im Übergangsbereich können auch bei der Analyse der Proben, bei denen der Abtrag mittels des gepulst betriebenen Scheibenlasers (cw) erfolgt ist, detektiert werden. Die Leiteroberfläche weist deutliche Kennzeichen einer Wechselwirkung mit der Laserstrahlung auf, wobei die Größe der Strukturen verglichen mit dem Faserlaser einem deutlich gesteigerten Brennfleckdurchmesser d<sub>B</sub> geschuldet sind. Es zeigt sich auch, dass die Seitenflächen eine höhere Fluoreszenzintensität aufweisen. Da im Prozess dennoch geringe Mengen aufsteigender Isolationspartikel beobachtet werden können wird gefolgert, dass der Abtrag als eine Mischung aus Verbrennen und Delamination in Folge der Laser-Material-Wechselwirkung mit dem Leiter erfolgt.

Bei Einsatz des gepulsten Scheibenlasers sind deutlich kürzere Pulsdauern  $t_P$  und höhere Pulsspitzenleistungen  $P_{L, S}$  zu erreichen. Aus der Oberflächenstruktur kann abgeleitet werden, dass in den Versuchen ein rechteckiger Fokuspunkt Anwendung findet und eine Wechselwirkung mit dem Leiter erfolgt. Da keinerlei Verbrennungsrückstände sichtbar sind und während des Prozesses aufsteigende Partikel beobachtet werden können, wird gefolgert, dass beim Einsatz infraroter Laser mit hohen Pulsspitzenleistungen  $P_{L, S}$  der Lackabtrag durch die von Davies und Crema beschriebene Delamination erfolgt [220; 222]. Auch lassen sich mit dieser Technologie niedrige Fluoreszenzintensitäten I<sub>F</sub> bei einer geringen Streuung realisieren.

Die Untersuchung eines kommerziell verfügbaren Systems, das die zuvor gesondert betrachteten  $CO_2$ - und Faserlaser kombiniert, ergibt, dass sich hiermit sehr gute Abtragsqualitäten realisieren lassen, wobei die Seitenflächen höhere Fluoreszenzintensitäten I<sub>F</sub> aufweisen. Das System setzt zunächst einen  $CO_2$ -Laser ein, bevor die Rückstände mit einem Faserlaser beseitigt werden. Da die Arbeitsbereiche der beiden Laser leicht versetzt sind, bestätigt sich in der Oberflächenanalyse die zuvor getätigte Beobachtung, dass der Faserlaser mit dem Kupferleiter wechselwirkt, während dies für den  $CO_2$ -Laser nicht zu beobachten ist. [221]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch Laserprozesse die Isolation von rechteckigen Kupferleitern mit ausreichenden Abtragsqualitäten entfernt werden kann. Beim Einsatz von Infrarotlasern mit kurzen Pulsdauern t<sub>P</sub> und hohen Pulsspitzenleistungen P<sub>L, S</sub> erfolgt der Abtrag in Folge einer Delamination, wohingegen CO<sub>2</sub>-Laser die Isolation verbrennen. Die identifizierten Mechanismen werden in Bild 26 gegenübergestellt. [P14]



Bild 26: Wellenlängenspezifische Mechanismen zum Abtrag der Lackisolation (in Anlehnung an: [P14])

### 4.2.2 Prozessbezogene Abhängigkeiten für infrarote Laser

Beim Einsatz von Lasern im Wellenlängenbereich der nahen Infrarotstrahlung werden in Abhängigkeit der Laserparameter zwei unterschiedliche Abtragsmechanismen hervorgerufen, wie im vorhergehenden Kapitel erläutert wird. So ist bei geringen Pulsspitzenleistungen  $P_{L,S}$  und hohen Pulsdauern  $t_P$  neben einem Verbrennen der Isolation auch der Mechanismus der Delamination zu beobachtet. Um den Einfluss dieser beiden Mechanismen auf die Abtragsqualität zu untersuchen, wird in dem Prozessfenster, in dem das Auftreten beider Abtragsmechanismen erwartet wird, ein Wirkungsflächenversuchsplan realisiert und ausgewertet. Die berücksichtigten Faktoren verdeutlicht Bild 27.



Bild 27: Faktorstufen und Rastergeometrie des Wirkungsflächenversuchsplans (in Anlehnung an: [S3])

In den Versuchen wird die Probenoberfläche in einer kontinuierlichen Vorschubbewegung mit parallelen Linien abgefahren, während der Laser gepulst emittiert. Hieraus ergeben sich elliptische Wechselwirkungsbereiche mit den in Bild 27 gezeigten Parameterabhängigkeiten. Der zur Versuchsdurchführung eingesetzte Scheibenlaser weist eine Wellenlänge  $\lambda$  von 1030 nm und einen Brennfleckdurchmesser d<sub>B</sub> von 255 µm auf.

In Bild 28 werden die im Versuchsplan ermittelten Haupteffekte dargestellt. In den untersuchten Faktorstufen weist die Pulsfrequenz  $f_P$  den größten Einfluss auf die Fluoreszenzintensität  $I_F$  auf, gefolgt von der Vorschubgeschwindigkeit f, der Laserleistung  $P_L$  und der Pulsdauer  $t_P$ .



Bild 28: Haupteffektdiagramme des laserbasierten Lackabtrags (Messdaten: [S3])

Die Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> wird gesenkt durch eine zunehmende Laserleistung P<sub>L</sub>, Pulsdauer t<sub>P</sub> und Pulsfrequenz f<sub>P</sub>, während eine geringere Vorschubgeschwindigkeit f die Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> in der gleichen Weise beeinflusst. Der Rasterabstand a<sub>L</sub> wird für ein Vertrauensniveau von 95 % als nicht signifikant bewertet. Da der Effekt sich im Bereich der Signifikanzschwelle befindet, bleibt der Term dennoch Bestandteil des statistischen Modells für weitergehende Analysen. Diese zeigen, dass zwischen der Pulsdauer t<sub>P</sub> und der Pulsfrequenz f<sub>P</sub> eine Wechselwirkung vorliegt, wobei die Erhöhung der Pulsdauer t<sub>P</sub> sich bei hohen Frequenzen f<sub>P</sub> durch eine stärkere Abnahme der Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> bemerkbar macht.

Bei einer hohen Laserleistung P<sub>L</sub> und zunehmendem Überlapp der einzelnen Wechselwirkungsbereiche entstehen lose anhaftende feine Verbrennungspartikel auf der Probenoberfläche. Da diese die Ergebnisse der Fluoreszenzmessung durch die Absorption des Lumineszenzlichts in Richtung niedrigerer Fluoreszenzintensitäten I<sub>F</sub> verfälschen, werden die Verbrennungsrückstände vor der messtechnischen Analyse entfernt. Die Entstehung der Verbrennungsrückstände wird damit erklärt, dass durch die Erhöhung des Energieeintrags der Abtragsmechanismus des Verbrennens der Lackisolation dominiert. Da für die betreffenden Parameterkombinationen die Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> die geringsten Werte annimmt wird abgeleitet, dass beim Lackabtrag mit dem betrachteten Lasersystem beim Verbrennen der Isolation Abtragsergebnisse mit geringen Isolationsrückständen erzielt werden.

Zur Visualisierung der untersuchten Parameterfelder sind in Bild 29 die zugehörigen Konturdiagramme mit der Zielgröße der Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> abgedruckt. Diese ermöglichen es, für das verwendete Versuchssystem und die abgedeckten Parameterbereiche, die erzielbare Abtragsqualität in Abhängigkeit der Prozessgrößen abzuschätzen.



Bild 29: Parameterfelder des laserbasierten Lackabtrags (Messdaten: [S3])

Die isolierte Betrachtung der in Bild 28 und Bild 29 dargestellten Abhängigkeiten zeigt, dass Parameter, die den Energieeintrag je Streckeneinheit erhöhen, geringere Isolationsrückstände zur Folge haben. Zur detaillierten Analyse wird die Streckenenergie für gepulste Laser E<sub>S, P</sub> nach Gleichung 5 bestimmt. Diese berechnet sich in Anlehnung an [161] und [223] aus der Laserleistung P<sub>L</sub>, der Pulsfrequenz f<sub>P</sub>, der Pulsdauer t<sub>P</sub> sowie der Vorschubgeschwindigkeit f.

$$E_{S,P} = \frac{P_{L,m}}{f} = \frac{P_L \times t_P \times f_P}{f}$$
(5)

Aus den Messdaten des Wirkungsflächenversuchsplans werden Faktorstufenkombinationen isoliert, die einen Wert der Streckenenergie gepulster Laser  $E_{S, P}$  von 1 J/mm aufweisen. Die Auswertung in Bild 30 verdeutlicht, dass trotz konstanter Werte von  $E_{S, P}$  die Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> starken einstellungsabhängigen Schwankungen unterliegt, woraus abzuleiten ist, dass das Abtragsergebnis nicht alleine vom streckenbezogenen Energieeintrag E<sub>S, P</sub> abhängt.



Bild 30: Erzielbare Abtragsergebnisse bei gleichbleibenden streckenbezogenen Energieeintrag  $E_{S, P}$  (Messdaten: [S3])

In den betrachteten Einstellbereichen zeigt sich insbesondere, dass sich bei geringeren Laserleistungen P<sub>L</sub> niedrigere Fluoreszenzintensitäten I<sub>F</sub> und somit bessere Abtragsergebnisse erzielen lassen. Dies wird darauf zurückgeführt, dass in Folge der starken Erwärmung der Kupferleiter die nicht verbrannte Isolation schmilzt. Diese geschmolzenen Isolationsreste kleben am Leiter an und können in Folge der Delamination nicht abgetragen werden.

Während der Versuchsdurchführung wird dokumentiert, dass das Prozessleuchten bei der Wechselwirkung der Laserstrahlung mit bereits von der Isolation befreiten Bereichen deutlich geringer ausfällt, als bei isolierten Bereichen. Zur Validierung der Beobachtung wird das Prozessleuchten mittels eines Multispektralsensors für sichtbares Licht, der 30 mm vom Leiter entfernt positioniert ist, messtechnisch erfasst. Im Rahmen der Experimente erfolgt bei einer niedrigen Laserleistung PL von 160 W ein neunfach wiederholter Lackabtrag in einem definierten Leiterbereich. Zwischen den Wiederholungen wird die Fluoreszenzintensität IF erfasst, um die verbleibenden Isolationsrückstände zu erfassen. Die Messung berücksichtigt die emittierten Wellenlängen  $\lambda$  von 550 nm, 570 nm sowie 600 nm, wobei sich die zugehörigen Spektralbereiche des Sensors aus der Halbwertsbreite FWHM von 40 nm um die zentralen Wellenlängen  $\lambda$  ergeben. Der Versuchsaufbau erfasst den Mittelwert der Zählimpulse z während des Abtragsprozesses, wobei der Sensor diese jeweils über einen Zeitraum t<sub>I</sub> von 166 ms integriert. Der Versuchsumfang beläuft sich auf zehn Probekörper. [224]

Die Auswertung in Bild 31 gibt die Mittelwerte und zugehörigen Standardabweichungen  $\sigma$  der Anzahl der Zählimpulse z sowie Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> an. In Abhängigkeit der Wiederholungen n<sub>A</sub> nimmt die Anzahl der Zählimpulse z ab, was verdeutlicht, dass die Intensität des Prozessleuchtens abnimmt. Dabei zeigen die drei berücksichtigten Wellenlängenbereiche  $\lambda$  einen nahezu parallelen Verlauf. Diese Reduktion ist darauf zurückzuführen, dass die Menge des im Prozess verbrannten Isolationsmaterials abnimmt. Der Zusammenhang wird von der parallel abnehmenden Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub>, die die Isolationsrückstände vor dem jeweiligen Abtragsdurchlauf repräsentiert, bestätigt. Die Streuung der Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> sowie die Anzahl der Zählimpulse z wird mit einer wachsenden Anzahl an Abtragsdurchgängen n<sub>A</sub> kleiner. Ab dem vierten Durchlauf sind für beide Größen nahezu keine Veränderung mehr zu identifizieren.



Bild 31: Prozessleuchten und Fluoreszenzintensität  $I_{\rm F}$  in Abhängigkeit der Anzahl an Abtragsvorgängen  $n_{\rm A}$ 

# 4.3 Benchmark mit alternativen Technologien und Fazit

Um die untersuchten Laserprozesse zum Abtrag der Isolation von rechteckigen lackisolierten Kupferleitern mit etablierten Abtragstechnologien vergleichen zu können, wird die Isolation des in Kapitel 4.2.1 verwendeten Lackdrahtes mittels induktiver Erwärmung, rotierender Bürsten und Abschälen entfernt. Dazu finden in Versuchen ermittelte Parameter Anwendung, mit denen für die jeweilige Technologie bestmögliche Abtragsergebnisse erzielt werden. Anschließend erfolgt eine Bewertung des Prozessergebnisses sowie die Gegenüberstellung mit einem laserbasierten Abtragsprozess. Zum Benchmark wird ein Scheibenlaser mit niedriger Pulsdauer t<sub>P</sub> und hoher Pulsspitzenleistung P<sub>L, S</sub> herangezogen, wie Tabelle 7 zeigt.

	induktive Erwärmung	rotierende Bürsten	Abschälen	Laser
Abtragsergebnis				
Abtragsqualität	I <sub>F</sub> = 3,5 RFU	I <sub>F</sub> = 15,0 RFU	$I_F = 2,4 \text{ RFU}$	$I_F = 8,4 \text{ RFU}$
Entfernung Rückstände notwendig	-	0	+	+
Übergangsbereich	-	-	+	+
Abtrag Leitermaterial	+	0	-	+
Schädigung Isolation	-	0	+	+
Taktzeit	+	0	+	0
Investitionskosten	0	+	0	-

Tabelle 7: Gegenüberstellung von Abtragsmechanismen für lackisolierte Kupferleiter (in Anlehnung an: [P14])

+ gut o neutral - schlecht

Verglichen mit alternativer Prozesstechnik vereint der laserbasierte Abtrag der Isolation von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen geringe Isolationsrückstände mit einem definierten Übergangsbereich ohne den Leiterquerschnitt zu verringern und die Isolation zu beschädigen, was das Potenzial dieser Technologie belegt. Dabei stellt zur Beurteilung der Abtragsqualität die Fluoreszenzmessung eine geeignete Messmethode dar. Darüber hinaus zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass sich das aus der Verbrennung von Isolationsmaterial resultierende Prozessleuchten mit der abgetragenen Menge verändert. Bei Nutzung eines entsprechenden Abtragsmechanismus stellt diese Erkenntnis die Grundlage zur Implementierung einer Prozessregelung dar.

Beim laserbasierten Abtrag der Isolation sind zwei Abtragsmechanismen zu unterscheiden, wodurch die Thesen von Davies et al. experimentell belegt werden. Während die Isolation mittlere Infrarotstrahlung absorbiert und dadurch verbrennt, ist diese für nahe Infrarotstrahlung transparent. Dadurch erfolgt die Absorption der Laserstrahlung am Kupferleiter, was eine Delamination zwischen Isolationsschicht und Substrat hervorruft, in deren Folge die Isolation abplatzt. Dieser Mechanismus dominiert beim Einsatz eines Festkörperlasers im Wellenlängenbereich  $\lambda$  von 1 µm mit einer kurzen Pulsdauer t<sub>P</sub> und hohen Pulsspitzenleistung P<sub>L</sub> s, wobei trotzdem Teile der Isolation verbrennen. Durch den Einsatz dieses einstufigen Abtragsprozesses gelingt es, reproduzierbar gute Abtragsqualitäten zu realisieren. Bei Verwendung mittlerer Infrarotstrahlung mit einer Wellenlänge  $\lambda$  im Bereich von 10 µm bleiben stets Isolationsreste auf der Oberfläche zurück. Damit die mit dem Verbrennen der Isolation realisierbaren, hohen Abtragsraten dennoch nutzbar sind, ist dieser Prozess mit einem zweiten Abtragsprozess auf Basis gepulster Laserstrahlung der Wellenlänge  $\lambda$  von ca. 1 µm zu kombinieren, um einen Abtrag mit geringen Isolationsrückständen zu realisieren. [221]

Vor diesem Hintergrund wird die Forschungsfrage, wie der Isolationslack unter Einsatz von Lasertechnologien reproduzierbar vom zu fügenden Leiterbereich abgetragen werden kann, beantwortet. Dies gelingt erst durch die messtechnische Erfassung des Abtragsergebnisses und die experimentelle Analyse der auftretenden Mechanismen, um ein hinreichendes Prozessverständnis zu schaffen. Zum Lackabtrag kann entweder ein gepulster Laser im Wellenlängenbereich  $\lambda$  von 1 µm mit hoher Pulsspitzenleistung und kurzer Pulsdauer eingesetzt werden. Alternativ ist auch die Kombination des genannten Systems mit einem Laser der Wellenlänge von 10 µm möglich, um hinreichende Abtragsergebnisse zu erzielen.

# 5 Prozesseinflussgrößen beim Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen

Zur Kontaktierung von Formspulenwicklungen im Laserstrahlschweißverfahren sind im Wickelkopf jeweils zwei parallel liegende abisolierte Kupferleiterbereiche durch Energieeinkopplung über die Stirnfläche zu fügen, wie Bild 32 zeigt. In der vorliegenden Dissertation werden, wie in Kapitel 2.4.3 abgeleitet, Laser im Wellenlängenbereich  $\lambda$  von 1000 nm mit einer hohen Laserleistung P<sub>L</sub> in Kombination mit kleinen Strahltaillendurchmessern d<sub>o</sub> für diese Aufgabe eingesetzt.



Bild 32: Anordnung der Kontaktstellen am Stator und einfallende Laserstrahlung

Aus den in Bild 9 zusammengefassten Anforderungen an die Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen geht hervor, dass die Kontaktstellen hinsichtlich ihrer mechanischen und elektrischen Eigenschaften zu beurteilen sind. Des Weiteren darf die Leiterisolation außerhalb des Fügebereichs nicht beschädigt werden, um Kurzschlüsse in der Wicklung zu vermeiden. Zur Beurteilung der mechanischen Festigkeit von Kontakten ist die Scherzugprüfung, in der die Bruchkraft ermittelt wird, eine zuverlässige Prüfmethode [116; 225]. Da die Lebensdauer der Wicklung elektrischer Maschinen maßgeblich von ihrer Einsatztemperatur abhängt und die am elektrischen Widerstand umgesetzte elektrische Leistung zu den elektrischen Verlusten der Maschine beiträgt, wird abgeleitet, dass der Kontaktwiderstand  $R_K$  das wesentliche Merkmal zur Charakterisierung von Kontaktstellen darstellt [226; 227].

Für das Laserstrahlschweißverfahren sind aus Fremdschichten, Zusatzwerkstoffen oder der Oberflächenrauheit resultierende Beiträge zum Kontaktwiderstand  $R_K$  zu vernachlässigen, da stoffschlüssige Verbindungen hergestellt werden [101]. Aus diesem Grund ist der Widerstand des Materials der Schweißnaht mit dem des unbeeinflussten Leiters vergleichbar [100]. Diese Annahme wird für laserstrahlgeschweißte Kupferverbindungen in [193] von Franco bestätigt. Folglich bestimmt unter den aufgeführten Voraussetzungen primär der Anbindungsquerschnitt  $A_K$  den Kontaktwiderstand  $R_K$ . Dieser resultiert im Modell einer idealen Schweißnaht neben der Einschweißtiefe  $t_W$  aus der Schweißnahtbreite  $b_W$ , welche der Leiterbreite  $b_L$  unter Berücksichtigung der Kantenradien  $r_L$  entspricht, wie Bild 33 zeigt. [P13]



Bild 33: Geometrische Abhängigkeiten der Fügezone

Im Schweißprozess entsteht ein ausgedehntes Schmelzbad zwischen den zu verbindenden Leitern, weswegen die Gefahr der Porenbildung im Schmelzbereich gegeben ist. Da diese den leitfähigen Querschnitt reduzieren wird erwartet, dass der Kontaktwiderstand R<sub>K</sub> dadurch zunimmt [103].

Der prozessbedingte Energieeintrag ruft einen Anstieg der Leitertemperatur hervor, woraus die Möglichkeit einer thermischen Schädigung der Isolation resultiert [P1]. Darüber hinaus entstehen beim Schweißen von Kupfer, wie in Kapitel 2.4.1 erläutert, häufig Schweißspritzer und Auswürfe [173]. Dabei gehen insbesondere Schmelzeauswürfe mit erhöhten Kontaktwiderständen  $R_K$  in Folge eines verringerten Anbindungsquerschnitts  $A_K$ einher und können Kurzschlüsse verursachen [104]. Neben der Verunreinigung des Stators resultiert zusätzlich die Gefahr, dass Kupferschmelze auf der Wicklung zum Liegen kommt und die Isolation thermisch beschädigt. Für den Fall, dass Laserstrahlung reflektiert oder nicht korrekt auf der Leiteroberfläche positioniert wird, kann diese außerhalb des Fügebereichs mit der Wicklung in Wechselwirkung treten und dort Isolationsschäden hervorrufen. Zusammenfassend ergeben sich beim Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen folgende Zielstellungen:

- Verringerung des Kontaktwiderstands  $R_K$  durch Erzielung einer möglichst breiten Schweißnaht mit einer hohen Einschweißtiefe  $t_W$
- Minimierung der Entstehung von Poren in der Fügezone zur Vermeidung einer Erhöhung des Kontaktwiderstands R<sub>K</sub>
- Ausschluss einer thermischen Schädigung der Primärisolation durch Beschränkung lokaler Temperaturmaxima
- Reduktion von Schweißspritzern und Auswürfen
- Unterdrückung der Bestrahlung isolierter Wicklungsteile

### 5.1 Thermische Wechselbeziehungen des Fügeprozesses

Da der zu fügende Kupferleiter eine hohe Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{th}$  aufweist, besteht das Risiko, dass dieser auch außerhalb der Fügezone Temperaturen  $\theta_W$  erreicht, die Schäden an der Primärisolation hervorrufen [9]. Aus diesem Grund ist die Kenntnis der prozessbedingten Temperaturverteilung essenziell, um einen kurzschlussbedingten Ausfall der Wicklung in Folge des Kontaktierungsprozesses zu vermeiden. Für eine Abschätzung wird ein vereinfachtes thermisches Modell des Laserstrahlschweißprozesses von Formspulenwicklungen in eine Simulation überführt. Dieses bildet den Laserstrahl als zweidimensionalen Wärmestrom ab, während die Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung der Fügezone thermische Energie entziehen. Innerhalb der Systemgrenzen werden die vier in Bild 34 dargestellten Wärmestromdichten  $\dot{q}$  berücksichtigt.



Bild 34: Thermische Betrachtung des Laserstrahlschweißprozesses (Formeln: [228])

Der Fügezone wird durch die aus der Laserstrahlung resultierende Wärmestromdichte  $\dot{q}_{Laser}$  Energie zugeführt, wobei diese neben der Laserleistung P<sub>L</sub> vom Absorptionsgrad  $\alpha$  und der Fläche des Brennpunktes A<sub>B</sub> abhängt. Innerhalb der Leiter treibt der Temperaturgradient  $\partial \theta_W / \partial_x$  einen Wärmestrom an, dessen Dichte  $\dot{q}_L$  zusätzlich von der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{th}$  abhängt. Dieser Bestandteil des Modells ist maßgeblich für die Erwärmung der Leiter außerhalb des Schmelzbereichs verantwortlich. Durch den konvektiven Wärmeübergang, dessen Wärmestromdichte  $\dot{q}_K$  vom Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_W$  sowie der Differenz der Oberflächentemperatur  $\theta_W$  und der Temperatur des umgebenden Mediums  $\theta_U$  bestimmt wird, geben die Werkstücke Wärme an die Umgebung ab. Dies gilt auch für den aus der Wärmestrahlung resultierenden Wärmestrom  $\dot{q}_S$ , der neben der Oberflächentemperatur der Leiter  $\theta_W$  auch vom Emissionskoeffizienten  $\varepsilon$  sowie der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma_B$ abhängt. [228]

#### 5.1.1 Numerische Bestimmung der Temperaturverteilung

Zur Berechnung der aus dem im vorhergehenden Kapitel aufgestellten Modell resultierenden maximalen Werkstücktemperaturen  $\theta_{W, max}$  ist neben der dreidimensionalen Ortskoordinate auch der zeitliche Verlauf zu berücksichtigen, weswegen zur Lösung eine FEM-Simulation herangezogen wird. Hierzu wird eine thermisch transiente Analyse in ANSYS Workbench durchgeführt. Die Randbedingungen der Simulation sind in Bild 35 dargestellt.



Bild 35: Randbedingungen der thermisch transienten Simulation in ANSYS (in Anlehnung an: [228; 229; 230; 231; 232; 233])

Für die Simulation werden zwei Leiter der Breite b<sub>L</sub> von 4,2 mm und Höhe h<sub>L</sub> von 2,5 mm, die unter einem Winkel zueinander angeordnet sind und sich in der Spitze berühren, modelliert. Der Kontakt wird als reibungsfrei gleitend festgelegt. Zur Vereinfachung des Modells erfolgt keine Abbildung der Kantenradien rL, wohingegen eine umgebende Isolationsschicht der Stärke h<sub>1</sub> von 93 µm in die Geometrie einbezogen wird. Der isolierte Bereich beginnt 20 mm unterhalb der Leiteroberkante und die Leiter weisen eine Länge l<sub>L</sub> von 100 mm auf. Wie aus Bild 35 hervorgeht, wird für den Kupferwerkstoff in der Simulation, neben der Temperaturabhängigkeit der Dichte  $\rho$  und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{th}$ , ein Verlauf der Enthalpie H zur Berücksichtigung der Phasenübergänge hinterlegt. Bei der Isolation werden diese Aspekte hingegen vernachlässigt, da in den isolierten Bereichen keine ausreichend hohen Werkstücktemperaturen  $\theta_W$  für Phasenübergänge erwartet werden. Da die Wärmestrahlung stark von der Werkstücktemperatur abhängt und diese im Bereich ohne Isolation am höchsten ausfällt, wird für das gesamte Modell der Emissionsgrad ε für geschabtes Kupfer von 0,07

festgelegt, während als Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_W$  für die freie Konvektion 8 W/m<sup>2</sup>K eingesetzt wird [230; 228]. Auf Grund der Temperaturabhängigkeit des Absorptionsgrades  $\alpha$  für Kupfer im festen Zustand wird in der Simulation ein mittlerer Wert von 7 % eingesetzt [163]. Die Wärmequelle in Form des Laserstrahls wird durch das Add-In Moving Heat Flux abgebildet und modelliert den zweidimensionalen gaußverteilten Wärmestrom g<sub>Laser</sub> auf Basis des Radius des Laserstrahls w und der Intensität I<sub>F</sub>, während die Vorschubbewegung durch Koordinaten beschrieben wird [231]. Für Bereiche unterhalb der Prozesszone ist zu erwarten, dass die maximale Temperatur  $\theta_{W, max}$  nicht unmittelbar mit dem Prozessbeginn erreicht wird. Aus diesem Grund wird die Simulation für ein fünfsekündiges Zeitintervall ab Einsetzen der Wärmequelle durchgeführt. Die Vorgänge im Schmelzbad werden nicht weitergehend berücksichtigt, es ist lediglich das Ziel der Simulation, die Verteilung der maximal auftretenden Temperaturen θw außerhalb der Schmelzzone abzuschätzen. Aus diesem Grund können aus dem Modell auch keine Rückschlüsse auf die resultierende Geometrie der Kontaktstelle gezogen werden.

In der Simulation wird ein Laserschweißprozess abgebildet, der eine aus drei Linien bestehende Vorschubgeometrie aufweist. Die Linien werden unmittelbar nacheinander, beginnend bei Linie 1, mit der gleichen Vorschubgeschwindigkeit f abgefahren, wobei die Laserleistung P<sub>L</sub> wie angegeben variiert [P13]. Die für das Prozessende simulierte Temperaturverteilung ist zusammen mit der zugehörigen Vorschubstrategie sowie den Laserparametern in Bild 36 dargestellt.



Bild 36: Simulierte Temperaturverteilung der laserbasierten Kontaktierung (in Anlehnung an: [S4])

### 5.1.2 Experimentelle Validierung des thermischen Modells

Zur Validierung wird der simulierte Versuch real durchgeführt und die ermittelten maximal auftretenden Werkstücktemperaturen  $\theta_W$  an definierten Positionen verglichen. Hierfür wird der in Anhang 2 spezifizierte Draht der Breite b<sub>L</sub> 4,2 mm und Höhe h<sub>L</sub> 2,5 mm gemäß Bild 37 in der Mitte der außenliegenden Seite mit vier Thermoelementen bestückt. Hierdurch können diese stirnseitig mit einem identischen Leiter verschweißt werden. Dabei wird auf eine geringe Masse der Drahtthermoelemente des Typs K geachtet. Die Befestigung erfolgt mittels eines wärmeleitfähigen Zements direkt auf dem Kupferleiter. Die von den Thermoelementen ausgegebenen zeitlichen Temperaturverläufe werden erfasst, exemplarische Temperaturverläufe sind aus Bild 37 ersichtlich.



Bild 37: Experimentelle Validierung des thermischen Modells (Messdaten: [S4])

Im Rahmen der Validierungsversuche werden fünf Schweißungen mit den in Bild 36 angegebenen Prozessparametern durchgeführt und für jedes Thermoelement der Mittelwert aus der im zeitlichen Verlauf auftretenden maximalen Werkstücktemperatur  $\theta_{W, max}$  berechnet. In Bild 38 erfolgt die Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Werte.



Bild 38: Gegenüberstellung gemessener und simulierter Maximaltemperaturen (gemessene und simulierte Daten: [S4])

Die Simulation wird unter den identischen Rahmenbedingungen durchgeführt und die maximale Knotentemperatur  $\theta_{W, max}$  für die Positionen der vier Thermoelemente ausgegeben. Der Vergleich der gemessenen und simulativ ermittelten Maximalwerte des Verlaufs der Temperatur  $\theta_W$  in den Messpunkten ergibt eine maximale absolute Abweichung von ca. 10 °C, was als ausreichende Übereinstimmung bewertet wird. Folglich kann das Simulationsmodell zur Abschätzung der prozessbedingt auftretenden Maximaltemperaturen herangezogen werden und bildet die Grundlage für die Beurteilung thermischer Isolationsschäden und zur Ermittlung der notwendigen Abtragslänge l<sub>A</sub>. Allerdings zeigt die in Bild <u>38</u> als Fehlerbalken eingetragene Standardabweichung  $\sigma$ , dass die messtechnisch ermittelten Maximaltemperaturen  $\theta_{W, max}$  einer nicht zu vernachlässigenden Streuung unterliegen. Diese sind, neben der Messunsicherheit, auch auf das schwankende Absorptionsverhalten von Kupfer zurückzuführen [165].

#### 5.1.3 Parameterabhängige Analyse von Temperaturfeldern

Aus Vorversuchen sind für die im Simulationsmodell abgebildeten Prozessgrößen der Vorschubgeschwindigkeit f sowie der Laserleistung PL geeignete Einstellbereiche bekannt. In neun Simulationen wird durch Kombination von jeweils drei Stufen der beiden Prozessparameter die maximal auftretende Temperatur  $\theta_{W, max}$  auf der Leiteroberfläche bestimmt. Wie Bild 36 verdeutlicht, kommt in den Simulationen eine Vorschubbewegung aus drei Linien zum Einsatz. Dabei beträgt die Laserleistung der Nebenbahnen PL N 50 % der Leistung der Vorschubbahn im Stoßbereich PL. In Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit f ergeben sich Prozesszeiten t<sub>Pr</sub> zwischen 0,252 s und 0,084 s. Da die Vorgänge im Schmelzbad in der Simulation nicht abgebildet werden, sind Rückschlüsse auf die resultierende Naht nicht zulässig. Die in Abhängigkeit des Abstands von der Leiteroberkante auftretenden maximalen Werkstücktemperaturen  $\theta_{W, max}$ fasst Tabelle 8 zusammen. Aus dem Schnittpunkt des Verlaufs der maximalen Werkstücktemperatur  $\theta_{W, max}$  mit der Wärmeschocktemperatur  $\theta_s$ kann abgeleitet werden, von welchem Bereich des Leiters die Isolation entfernt werden muss, um Isolationsschäden zu vermeiden. Für die analysierten Parameterkombinationen beträgt die notwendige Abtragslänge l<sub>A</sub> maximal ca. 12,5 mm. Diese soll generell möglichst kurz ausfallen, um die Zykluszeit des Abtragsprozesses zu verkürzen. Außerdem muss der betroffene Bereich im Anschluss wieder mit einer Isolation versehen werden.

Tabelle 8: Simulierte Verläufe der im Laserschweißprozess maximal auftretenden Werkstücktemperaturen  $\theta_{W, max}$  (simulierte Daten: [S4])



### 5.2 Prozessbezogene Einflussgrößen der laserbasierten Kontaktierung

Bild 19 stellt die Prozessgrößen für die Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen strukturiert in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm dar. Die darin als relevant bewerteten Einflussgrößen werden experimentell untersucht, um ein umfassendes Verständnis der Abhängigkeiten des Prozesses zu schaffen. Hierfür kommt das in Bild 39 gezeigte Versuchssystem, das aus einer Strahlquelle, einer programmierbaren Fokussieroptik und lasersicheren Einhausung inklusive Achssystem sowie Absaugung besteht, zum Einsatz.



Bild 39: In Experimenten eingesetztes Versuchssystem

Als Strahlquelle wird ein Scheibenlaser TruDisk 8001 in Kombination mit einer programmierbaren Fokussieroptik PFO 33-2 HAS des Herstellers TRUMPF verwendet. Die Laserkomponenten sind integriert in eine Laserbearbeitungszelle ERLASER UNIVERSAL vom Hersteller ERLAS, die neben der Einhausung ein Achssystem sowie eine Absaugung umfasst. Detaillierte Informationen zum Versuchssystem können Anhang 3 entnommen werden. In den Experimenten kommen die in Anhang 2 beschriebenen Probekörper mit variierenden Leitergeometrien zum Einsatz. Eine für die Untersuchungen konzipierte Vorrichtung zur Aufspannung der Leiter in den Versuchen ermöglicht die gezielte Positionierung der Probekörper zueinander. In Anhang 4 erfolgt die Beschreibung der Vorrichtung sowie des Versuchsaufbaus. Die hergestellten Kontaktstellen sind im Hinblick auf ihre elektrischen und mechanischen Eigenschaften zu evaluieren. Darüber hinaus werden metallographische Analysen sowie zur Beurteilung der Zuverlässigkeit Umweltsimulationen eingesetzt. Für die Bewertung der elektrischen Eigenschaften wird der Kontaktwiderstand R<sub>K</sub> herangezogen [234]. Dessen direkte messtechnische Erfassung ist allerdings nicht möglich, da dies eine alleinige Ankontaktierung der Verbindungsfläche zwischen den Leitern voraussetzt. Dabei ist diese Fläche stets vom Leitermaterial der gefügten Drähte umgeben. Erschwerend kommt hinzu, dass im Rahmen der Versuche die resultierenden Dimensionen der Schweißnähte nicht bekannt sind. Aus diesem Grund wird der Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> bestimmt, indem die Ankontaktierung für die elektrische Messung im unbeeinflussten Leiterbereich, mit einem definierten Abstand a<sub>W</sub> von der Probenoberseite, erfolgt. Dies wird in Bild 40 verdeutlicht. [P13]



Bild 40: Ersatzschaltbild der Messung des Widerstands der Fügezone RF

Das Ersatzschaltbild in Bild 40 zeigt das idealisierte Widerstandsmodell der Messung. Unter der Annahme, dass der Abstand zwischen den verbundenen Leitern zu vernachlässigen ist und die Außenabmessungen der Leiter unbeeinflusst bleiben, kann der Fügebereich als Parallelschaltung der Leiter entsprechend der Einschweißtiefe t<sub>w</sub> abgebildet werden. Der Fügebereich ist mit der verbleibenden Länge des Messabstands a<sub>w</sub> der beiden Leiter in Reihe geschalten.

Zur Erfassung des Widerstands der Fügezone R<sub>F</sub> wird der in Anhang 5 vorgestellte Messaufbau eingesetzt, der zusätzlich die Ermittlung des Widerstands eines unbeeinflussten Leiters R<sub>u</sub> ermöglicht. Die Messaufnahme nimmt die Probekörper auf und definiert ihre Position, damit eine reproduzierbare Ankontaktierung durch pneumatische Kontaktstifte erfolgt. Um den Einfluss der Werkstücktemperatur während der Messung  $\theta_{Mess}$  zu kompensieren, ist in die Probenaufnahme ein Temperatursensor integriert. Die Messung der beiden Widerstände erfolgt, indem der Probekörper durch eine Stromquelle mit einem definierten Messstrom I<sub>M</sub> beaufschlagt wird, während die Spannungsabfälle U<sub>F</sub> und U<sub>u</sub> mittels zweier Voltmeter erfasst werden. Dabei kommt eine Vierdrahtmessung mit getrennten Leiterpaaren für die Stromeinspeisung und den Spannungsabgriff zum Einsatz, weswegen Kontakt- und Leitungswiderstände zu vernachlässigen sind [235]. Für den kompletten Messaufbau wird in Anhang 5 eine Messabweichung von  $\pm 1,4$  % des Messwerts abgeschätzt. Dieser Wert ist, sofern nicht anderweitig spezifiziert, in den Auswertungen als Fehlerbalken für den Widerstand R<sub>F</sub> eingetragen.

Bei der Messung niedriger Spannungen  $U_M$  sind aus Thermospannungen und elektromagnetischen Störungen resultierende Messabweichungen wesentliche Fehlerursachen. Um diese zu kompensieren, wird das Messprinzip der Deltamessung eingesetzt, das in [236] erläutert wird. Dabei wird der Messstrom I<sub>M</sub> schnell umgepolt und synchron dazu der Spannungsabfall gemessen. Durch die Berechnung der Spannung U<sub>M</sub> aus den resultierenden Spannungsflanken werden Thermospannungen, die aus Temperaturunterschieden im Messkreis oder dem Kontakt unterschiedlicher Materialien resultieren, kompensiert. Zusätzlich wird durch den alternierenden Messstrom I<sub>M</sub> das Signal-Rausch-Verhältnis erhöht, wodurch sich die Immunität der Messung gegen weißes Rauschen mit einem kontinuierlichen Frequenzbereich verbessert. [236; 237]

In Kapitel 5 ist dokumentiert, dass der Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> von der Anbindungsfläche A<sub>K</sub> bestimmt wird. Unter Annahme einer gleichbleibenden Schweißnahtbreite b<sub>W</sub> sowie der Vernachlässigung von Poren ergibt sich, dass zwischen der Einschweißtiefe t<sub>W</sub> und dem Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> eine Korrelation besteht. Zur Verifizierung dieser These werden Versuchskörper mit variierenden Einschweißtiefen t<sub>W</sub> aus isolierten Kupferleitern hergestellt und deren Verbindungswiderstand R<sub>F</sub> bestimmt. Im Anschluss werden die Musterteile computertomografisch im Hinblick auf die Entstehung von Poren bewertet und die Einschweißtiefe t<sub>W</sub> in Schliffbildern analysiert, wie Bild 41 verdeutlicht.



Bild 41: Computertomografische Aufnahmen einer exemplarischen Kontaktstelle

Aus den Röntgenaufnahme geht hervor, dass sich größere Poren vornehmlich am Nahtrand im Bereich der Schweißwurzel bilden. Hingegen nehmen kleinere Poren in Richtung des Nahtauslaufs zu, wobei diese eher im oberen Nahtbereich aufgefunden werden. Die in Bild 42 dargestellte Regressionsanalyse verdeutlicht, dass im betrachteten Bereich ein linearer Zusammenhang zwischen der Einschweißtiefe t<sub>W</sub> und dem Widerstand des Fügebereichs R<sub>F</sub> angenommen werden kann, was bereits in [P13] auf Grundlage eines kleineren Versuchsumfangs ermittelt wurde. Dies wird von einem Korrelationskoeffizienten r von -0,94 untermauert. In der Auswertung ist neben der Regressionsgeraden auch die Messunsicherheit der Widerstandsmessung sowie das 95 %-Konfidenzintervall eingetragen. Zusätzlich wird der Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> in Abhängigkeit von der Einschweißtiefe t<sub>W</sub> analytisch hergeleitet und in dem Diagramm dargestellt. Dabei beruht die Berechnung auf der in Schliffbildern ermittelten Leitergeometrie sowie dem Blockschaltbild in Bild 40.



Bild 42: Regressions analyse zwischen der Einschweißtiefe t<sub>W</sub> und dem Fügezonenwiderstand R<sub>F</sub> (Proben:  $b_L = 4,5$ ;  $h_L = 2,36$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S5])

Der analytische Zusammenhang zwischen Widerstand R<sub>F</sub> und Einschweißtiefe t<sub>w</sub> weicht nur geringfügig innerhalb des 95 %-Konfidenzintervalls von der experimentell bestimmten Regressionsgeraden ab, wobei die Differenz bei geringen Einschweißtiefen t<sub>w</sub> geringfügig höher ausfällt. Die Abweichung und Streuung der gemessenen Werte wird darauf zurückgeführt, dass die gemessene Einschweißtiefe t<sub>w</sub> von der Schliffebene abhängt. Außerdem ist die sich ergebende Geometrie der Fügestelle, insbesondere das Auffüllen des Fügespalts mit Schmelze im Bereich der Kantenradien, nicht reproduzierbar und kann daher in der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Gleiches gilt für das Auftreten von Poren in der Schweißnaht. Die Beurteilung der mechanischen Probeneigenschaften erfolgt durch die Ermittlung der mechanisierten Schälfestigkeit  $F_{S, max}$  nach DIN EN ISO 14270. Dafür werden die freien Enden der hergestellten Probekörper gebogen und der Verlauf der Schälkraft  $F_S$  in einer Zugprüfung quantifiziert, wie Anhang 6 beschreibt. [238]

Für den späteren Einsatz des entwickelten Fügeprozesses bei der Herstellung von automobilen Traktionsantrieben ist es wichtig eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Kontaktstellen treffen zu können. Zu diesem Zweck werden Umweltsimulationen in Anlehnung an ISO 16750 durchgeführt, die den Test elektrischer Fahrzeugkomponenten im Hinblick auf Umgebungsbedingungen definiert [239]. Für die Beurteilung, ob Temperaturzyklen mechanische Schäden an den Kontaktstellen verursachen, kommt die in Anhang 7 beschriebene Temperaturschockprüfung zum Einsatz [240]. Zusätzlich erfolgt die Belastung von Probekörpern mit temperaturüberlagerten Vibrationsprofilen in dem in Anhang 8 spezifizierten Prüfablauf [241].

In Kapitel 2.4 wird identifiziert, dass die Bildung von Schweißspritzern eine Herausforderung beim Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen darstellt. Für die messtechnische Erfassung wird die Massendifferenz  $\Delta m$ durch Erfassung der Probenmasse vor und nach dem Schweißprozess berechnet [242]. Dafür kommt eine Waage mit einer Linearitätsabweichung von 0,3 mg zum Einsatz. Zur Berechnung der Massendifferenz  $\Delta m$  wird die Probenmassen nach dem Schweißprozess m<sub>2</sub> von der Masse vor dem Schweißprozess m<sub>1</sub> abgezogen, wie Gleichung 6 verdeutlicht. Hierdurch wird ein Massenverlust als positiver Wert dargestellt.

$$\Delta m = m_1 - m_2 \tag{6}$$

Die Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass die Entstehung von Schweißspritzern bei einer hohen Anzahl an Versuchen erfasst werden kann. Allerdings unterliegt diese Ungenauigkeiten. Hierzu gehört, dass auf den Probekörpern zum Liegen kommende Schweißspritzer nicht detektiert werden können, da sie nicht in die Massendifferenz ∆m einfließen. Dieser Fehlerquelle wird mit dem Einsatz der in Anhang 4 vorgestellten Spannvorrichtung begegnet. Durch die Ausrichtung der Proben und die Verwendung von Abschirmblechen beschränkt sich die Probenoberfläche, auf der Schweißspritzer zum Liegen kommen können, sehr stark. Dennoch wird bei der Messung auf anhaftende Schweißspritzer geachtet. Gleiches gilt für anderweitige Verunreinigungen, die während der Versuchsdurchführung entstehen. Eine weitere Fehlermöglichkeit liegt darin, dass verbrennendes bzw. verdampfendes Material durch die Erhöhung der Massendifferenz  $\Delta m$  als Auswurf interpretiert werden kann. Im konkreten Anwendungsfall kann neben dem Kupferwerkstoff auch die Isolation verbrennen bzw. verdampfen. Da die Leiter vor den Schweißversuchen im Fügebereich auf einer ausreichenden Länge vom Isolationsmaterial befreit werden, ist nicht von einem nennenswerten Einfluss auszugehen. Hingegen kann das Verdampfen von Kupfer nicht vermieden werden, da sich beim Tiefschweißen eine Dampfkapillare ausbildet [161]. Nagel et al. ermitteln für das Tiefschweißen von Stahl, dass der aus verdampfendem Material resultierende schweißnahtlängenbezogene Massenverlust ca. um den Faktor 25 bis 40 geringer ist, als dies beim Auftreten von Schweißspritzern der Fall ist [243]. Da der zu erwartende Einfluss gering ausfällt, wird dieser Mechanismus vernachlässigt.

# 5.2.1 Abhängigkeit der Kontaktstelleneigenschaften von Prozessparametern

Unter den Prozessgrößen werden alle Parameter zusammengefasst, die direkt am Lasersystem eingestellt werden können, um den Kontaktierungsprozess zu beeinflussen. Dabei stellen die Vorschubgeschwindigkeit f und die Laserleistung P<sub>L</sub> wesentliche Stellgrößen dar. Zusätzlich findet die nach Gleichung 7 definierte abgeleitete Größe der Streckenenergie E<sub>S</sub> Anwendung, die als Maß für den Eintrag thermischer Energie sowie den zu erwartenden Nahtquerschnitt herangezogen wird. [161]

$$E_{S} = \frac{P_{L}}{f}$$
 [161] (7)

Zur systematischen Ermittlung des Einflusses der drei Prozessgrößen auf den erzielbaren Widerstand R<sub>F</sub> und die Bildung von Auswürfen beim Schweißen flachleiterbasierter Formspulenwicklungen werden diese gezielt variiert. Dabei kommen Musterteile mit den Abmessungen b<sub>L</sub> von 4,2 mm und h<sub>L</sub> von 2,5 mm, die mit Nullspalt (s<sub>F</sub> = 0 mm) verschweißt werden, zum Einsatz. Der Vorschub erfolgt in einer geradlinigen Bewegung entlang der Fuge zwischen den Leitern über die komplette Leiterbreite b<sub>L</sub>. Für jeden Versuchspunkt wird der arithmetische Mittelwert des Widerstands R<sub>F</sub> aus drei Replikationen errechnet.

Aus der Auswertung in Bild 43 geht hervor, dass der Fügezonenwiderstand  $R_F$  mit steigender Laserleistung  $P_L$  ab- und mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit f zunimmt. Des Weiteren zeigt die Analyse der Bildung von Auswürfen, dass höhere Laserleistungen  $P_L$  diese begünstigen. Eindeutig

belegt werden kann, dass eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit f bis zu einem Wert von 100 mm/s die Entstehung von Auswürfen reduziert und darüber hinaus keine maßgebliche Reduktion erzielt wird. Daher sind für den Anwendungsfall Vorschubgeschwindigkeiten f ab 100 mm/s zu bevorzugen. In den untersuchten Parameterbereichen können keine Hinweise auf das Auftreten des Humpings detektiert werden, da keine Nahteinfälle und -überhöhungen sichtbar sind.



Bild 43: Fügezonenwiderstand R<sub>F</sub> und Massendifferenz  $\Delta m$  in Abhängigkeit des Vorschubs f und der Laserleistung P<sub>L</sub> (Proben: b<sub>L</sub> = 4,2; h<sub>L</sub> = 2,5; Cu-ETP) (Messdaten: [P16; S6])

Die in Abhängigkeit der Streckenenergie  $E_s$  und Laserleistung  $P_L$  erzielbaren Widerstände der Fügezone  $R_F$  und Massendifferenz  $\Delta m$  werden in Bild 44 zusammengefasst. Bei niedrigen Laserleistungen  $P_L$  von 1000 W kann erst ab einer Streckenenergie  $E_s$  von 160 J/mm eine Verbindung hergestellt werden. Der erzielbare Widerstand  $R_F$  nimmt mit zunehmenden Werten der Streckenenergie  $E_s$  ab. Bei konstanter Streckenenergie  $E_s$  führen gesteigerte Laserleistungen  $P_L$  zu niedrigeren Werten des Widerstands  $R_F$ . Dies wird damit begründet, dass beim Laserstrahlschweißen von Kupfer die Wärmeleitung eine wichtige Einflussgröße darstellt und die Prozesszeit  $t_{Pr}$  in Folge höherer Vorschubgeschwindigkeiten f reduziert wird. Aus diesem

Grund ist in Kombination mit der Streckenenergie  $E_s$  auch der Vorschub f zu berücksichtigen. Mit steigenden Streckenenergien  $E_s$  treten auch stärkere Schweißauswürfe auf.



Bild 44: Widerstand R<sub>F</sub> und Massendifferenz  $\Delta m$  abhängig von der Streckenenergie E<sub>S</sub> und der Laserleistung P<sub>L</sub> (Proben: b<sub>L</sub> = 4,2 mm; h<sub>L</sub> = 2,5 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S6])

Bei Fügespalten  $s_F$  von mehr als 0,1 mm ergibt sich ein verstärkter Einfall der Schweißnahtoberfläche, der mit erhöhten Werten des Fügezonenwiderstands  $R_F$  einhergeht. Als Begründung hierfür ist anzuführen, dass die Menge des aufgeschmolzenen Materials nicht ausreicht, um den Spalt zwischen den zu verbindenden Leitern großflächig aufzufüllen. Zudem kann angenommen werden, dass im nachgelagerten Prozessschritt zur Isolation der Kontaktstellen das eingesetzte viskose Material nicht ausreichend in das sich ergebende Tal fließt und schlechter anhaftet. Um ein größeres Schmelzbad auszubilden, wird die Vorschubgeometrie des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche um zwei Nebenbahnen erweitert. Diese sind vom Zentrum der Fuge um einen definierten Versatz  $s_N$  verschoben, wobei die Laserleistung  $P_{L,N}$  beträgt. Dies verdeutlicht Bild 45. Die beiden Nebenbahnen werden vor der Schweißgeometrie im Fugenbereich abgefahren. Wegen der hohen Sprunggeschwindigkeit der Scanner-Optik ist der zeitliche Versatz zwischen den Bahnen zu vernachlässigen.



Bild 45: Reduktion des Nahteinfalls durch Erweiterung der Vorschubgeometrie (in Anlehnung an: [P13; P15])

Zur Bestimmung geeigneter Einstellungen für den Versatz  $s_N$  sowie der Laserleistung der Nebenbahnen  $P_{L, N}$  werden Proben mit einem Fügespalt  $s_F$  von 0,3 mm hergestellt, wobei die Laserleistung  $P_L$  bei 7000 W und die Vorschubgeschwindigkeit f bei 70 mm/s liegt. Die Laserleistung der Nebenbahnen  $P_{L, N}$  wird bei einem konstanten Versatz  $s_N$  von 0,5 mm, der Versatz der Nebenbahnen  $s_N$  bei einer gleichbleibenden Leistung  $P_{L, N}$  von 4200 W variiert. In Bild 46 wird die Beeinflussung der Kontaktstelle durch die Erweiterung der Vorschubgeometrie dargestellt.



Bild 46: Einfluss von Nebenbahnen auf das Schweißergebnis ( $P_L$  = 7000 W; f = 70 mm/s; s<sub>F</sub> = 0,3 mm; Proben:  $b_L$  = 4,2 mm;  $h_L$  = 2,5 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S6; P13])

Mit einer zunehmenden Laserleistung der Nebenbahnen P<sub>L, N</sub> sinkt der Widerstand R<sub>F</sub> und der Nahteinfall reduziert sich. Allerdings kann auch ein starker Anstieg der Bildung von Auswürfen beobachtet werden. Mit zunehmender Verschiebung s<sub>N</sub> der Nebenbahnen von der Fuge nimmt der Widerstand des Fügebereichs R<sub>F</sub> ab. Ab einem Versatz s<sub>N</sub> von ca. 0,5 mm bis o,6 mm steigen die Widerstände R<sub>F</sub> wieder an. Dies wird darauf zurückgeführt, dass bei einem zu großen Abstand s<sub>N</sub> die entstehenden Schmelzbäder schlechter zusammenfließen. Die Analyse der Massendifferenz  $\Delta m$ zeigt, dass diese mit steigendem Versatz s<sub>N</sub> zunimmt, was auf ein verstärktes Auftreten von Auswürfen hindeutet. Dies kann mit der Zunahme der Schmelzbadoberfläche begründet werden.

Obwohl bei den Versuchsteilen im Schweißbereich auf einer Länge von 18 mm der Isolationslack entfernt wird, treten insbesondere auf der Seitenfläche der Leiter im Bereich des Nahtendes Schäden an der tieferliegenden Isolation auf. Da die Isolationsschäden nur punktuell und nicht am Umfang verteilt auftreten, wird geschlossen, dass diese aus einer direkten Wechselwirkung mit der Laserstrahlung oder mit dem austretenden Metalldampf resultieren. Die Annahme wird auch von den Simulationen in Kapitel 5.1.3 unterstützt, da im betreffenden Bereich keine ausreichend hohen Temperaturen zur Verursachung von Isolationsschäden zu erwarten sind. Aus diesem Grund wird die in Bild 45 gekennzeichnete Länge der Vorschubbahn  $I_S$  systematisch variiert und der Einfluss auf die Kontaktstelleneigenschaften ermittelt. In den Versuchen wird die Hauptvorschubgeometrie mit einer Laserleistung P<sub>L</sub> von 7000 W und einer Vorschubgeschwindigkeit f von 70 mm/s abgefahren. Die Schweißgeometrie wird mittig an der Leiterbreite b<sub>L</sub> ausgerichtet.



Bild 47: Abhängigkeit des Widerstands  $R_F$  und der Massendifferenz  $\Delta m$  von der Länge der Schweißgeometrie  $l_S$  ( $P_L = 7000$  W; f = 70 mm/s;  $s_F = 0$  mm; Proben:  $b_L = 4,2$  mm;  $h_L = 2,5$  mm; Cu-ETP) (Messdaten: [P13; S6])

Aus der Versuchsauswertung in Bild 47 wird sichtbar, dass für Schweißgeometrielängen  $l_s$  von 112 % bis 74 % der Leiterbreite  $b_L$  die Widerstände des
Kontaktbereichs R<sub>F</sub> lediglich im Bereich der Messunsicherheit schwanken. Erst ab kürzeren Geometrielängen l<sub>s</sub> wird eine signifikante Erhöhung des Widerstands R<sub>F</sub> beobachtet. Die Massendifferenz  $\Delta$ m nimmt mit der Verkürzung der Länge der Schweißgeometrie l<sub>s</sub> ab. Die optische Analyse zeigt, dass unterhalb einer Schweißnahtlänge l<sub>s</sub> von 74 % keine Isolationsschäden auftreten.

In Kapitel 2.4.1 wird erläutert, dass Reflexionen auf der Werkstückoberfläche Schäden an den optischen Komponenten des Lasersystems hervorrufen können. Um dies zu vermeiden sind Einfallswinkel  $\Theta$  von 90° auszuschließen. Durch den Einsatz von programmierbaren Fokussieroptiken lassen sich schnelle zweidimensionale Vorschubbewegungen realisieren, indem der Laserstrahl mittels zweier orthogonal zueinander ausgerichteter Spiegel abgelenkt wird [161]. Für das Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen bietet der Einsatz derartiger Optiken den Vorteil, dass alle Vorschub- und Positionierbewegungen dynamisch, ohne den Stator zu bewegen, erfolgen können. Außerdem werden durch die Positionierung der Schweißstelle außerhalb des Zentrums der Bearbeitungsoptik Einfallswinkel  $\Theta$  von 90° vermieden, wie Bild 48 verdeutlicht.



Bild 48: Einfallswinkel $\Theta$  beim Einsatz von Scanner-Optiken

Um zu validieren, ob der Kontaktstellenwiderstand  $R_F$  von der Position der Fügestelle im Arbeitsfeld der Scanner-Optik abhängt, werden die Proben entlang der x- und y-Achse versetzt geschweißt. Die Vorschubbewegung verläuft dabei entlang der y-Achse. Die zugehörigen Widerstandswerte  $R_F$ sind in Bild 49 zusammengefasst. Jeder Datenpunkt stellt das arithmetische Mittel aus fünf Versuchen und die Fehlerbalken die Standardabweichung  $\sigma$ innerhalb der Versuchspunkte dar. Bei der isolierten Betrachtung der beiden Raumrichtungen zeigt sich, dass für kleine Auslenkungen die erzielbaren Widerstandswerte  $R_F$  abnehmen, bevor sie mit zunehmendem Versatz kontinuierlich ansteigen. Generell sind für eine Verschiebung entlang der Schweißgeometrie (Auslenkung in y-Richtung) niedrigere Widerstände  $R_F$ und Standardabweichungen  $\sigma$  als bei einem senkrechten Versatz zu erreichen (x-Richtung).



Bild 49: Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> in Abhängigkeit der Auslenkung vom Zentrum des Bearbeitungsfelds (P<sub>L</sub> = 7000 W; f = 70 mm/s; s<sub>F</sub> = 0 mm; Proben: b<sub>L</sub> = 4,5 mm; h<sub>L</sub> = 2,36 mm; Cu-ETP; Schweißgeometrie: eine Linie im Fugenbereich) (Messdaten: [S7])

Bei gleichzeitiger Verschiebung entlang beider Achsen stellen sich die höchsten Streuungen  $\sigma$  und Widerstandswerte R<sub>F</sub> ein, ein Muster der Veränderung kann nicht abgeleitet werden. Hingegen ist für die Massendifferenz  $\Delta$ m kein Einfluss zu identifizieren. Da die Optik mit einem F-Theta-Objektiv ausgestattet ist, ist innerhalb des elliptischen Arbeitsfelds nicht von einer Verschiebung der Fokuslage auszugehen. Daher sind die Veränderungen in Übereinstimmung mit [176] auf ein variierendes Reflexionsverhalten in Folge der Änderung des Einfallswinkels  $\Theta$  zurückzuführen.

Die in den Versuchen eingesetzte programmierbare Fokussieroptik ermöglicht die Realisierung flexibler Vorschubgeometrien. Neben linienförmigen erfolgt auch die Untersuchung elliptischer und rechteckiger Vorschubbewegungen, wobei diese mehrfach fortlaufend abgefahren werden. Auf Basis von Vorversuchen werden geeignete Einstellbereiche für die Parameter der Laserleistung P<sub>L</sub>, Vorschubgeschwindigkeit f, Geometriebreite b<sub>S</sub> sowie Anzahl der Geometriewiederholungen n<sub>G</sub> festgelegt. Die Geometrielänge l<sub>S</sub> wird auf Grundlage der vorangegangenen Versuche auf 3 mm festgelegt, um Isolationsschäden vorzubeugen. Da der Betrachtungsraum vier Größen umfasst, werden die Untersuchungen unter Zuhilfenahme eines zweistufigen vollfaktoriellen Versuchsplans durchgeführt, wie Bild 50 verdeutlicht.



Bild 50: Rechteckige und elliptische Vorschubgeometrie sowie Faktorstufen (in Anlehnung an: [S8])

Zur Analyse erfolgt der Aufbau mathematischer Modelle in einer Statistiksoftware, um die Abhängigkeit der Massendifferenz  $\Delta m$  und des Widerstands der Fügezone R<sub>F</sub> von den signifikanten Faktoren zu beschreiben. Die überlagerten Konturdiagramme in Bild 51 verdeutlichen, ausgehend von der Laserleistung P<sub>L</sub>, die Abhängigkeit der Zielgrößen von den Eingangswerten für die elliptische Vorschubgeometrie und kennzeichnen die Optimierungsrichtungen.



Bild 51: Parameterfelder der elliptischen Vorschubgeometrie ( $s_F = 0 mm$ ;  $l_S = 3,0 mm$ ; Proben:  $b_L = 4,2 mm$ ;  $h_L = 2,5 mm$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S8])

Wie bei der geradlinigen Vorschubgeometrie in Bild 43 werden mit gesteigerten Leistungen P<sub>L</sub> geringere Werte des Widerstands R<sub>F</sub> erzielt. Die Bildung von Auswürfen nimmt mit der Verringerung der Laserleistung P<sub>L</sub> ab. Eine gesteigerte Anzahl an Wiederholungen n<sub>G</sub> verursacht höhere Massendifferenzen  $\Delta m$  und niedrigere Widerstände der Fügezone R<sub>F</sub>, die auch mit einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit f abnehmen. Im Gegensatz zum geradlinigen Vorschub bedingen höhere Vorschubgeschwindigkeiten f höhere Massendifferenzen  $\Delta m$ . Dies wird darauf zurückgeführt, dass die auf die Kapillarwand wirkenden Fliehkräfte mit der Vorschubgeschwindigkeit f zunehmen. Der Widerstand R<sub>F</sub> nimmt mit kleiner werdenden Geometriebreiten b<sub>S</sub> ab, was durch den höheren Energieeintrag im Bereich der Fuge auf eine höhere Einschweißtiefe t<sub>W</sub> zurückgeführt wird. Hingegen nehmen Auswürfe mit höheren Geometriebreiten b<sub>S</sub> ab, ebenso wie das Aufspreizen des Bereichs auf eine geringer werdende Sensitivität der Massendifferenz  $\Delta$ m hinweist.

Auch im Modell für die rechteckige Vorschubgeometrie in Bild 52 führen höhere Laserleistungen P<sub>L</sub> zu niedrigeren Widerständen R<sub>F</sub> und größeren Massendifferenzen  $\Delta m$ . Es zeigt sich, dass die Massendifferenzen  $\Delta m$  in den untersuchten Parameterbereichen deutlich höher ausfallen als bei der elliptischen Vorschubgeometrie, was auf höhere Turbulenzen im Schmelzbad in Folge des rapiden Richtungswechsels zurückgeführt wird.



Bild 52: Parameterfelder der rechteckigen Vorschubgeometrie ( $s_F = 0 \text{ mm}$ ;  $l_S = 3,0 \text{ mm}$ ; Proben:  $b_L = 4,2 \text{ mm}$ ;  $h_L = 2,5 \text{ mm}$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S8])

Wie bei der elliptischen Vorschubgeometrie führt ein häufigeres Abfahren zu abnehmenden Widerständen R<sub>F</sub> und höheren Massendifferenzen  $\Delta m$ . Mit zunehmenden Vorschubgeschwindigkeiten f nimmt der Widerstand R<sub>F</sub> zu, hingegen verringert sich die Bildung von Auswürfen in Übereinstimmung mit den in Bild 43 dokumentierten Zusammenhängen. Während die Geometriebreite b<sub>S</sub> auf die Massendifferenz  $\Delta m$  keinen Einfluss hat, werden auch bei der rechteckigen Vorschubgeometrie geringere Widerstände R<sub>F</sub> bei kleineren Breiten b<sub>S</sub> erzielt.

Die Parametersätze beider Prozessvarianten werden mit Hilfe mathematischer Modelle optimiert, indem die Massendifferenz  $\Delta m$  sowie der Widerstand R<sub>F</sub> minimiert werden. Für beide Vorschubgeometrien ergibt die mathematische Parameteroptimierung gleiche Einstellwerte, wie Bild 53 verdeutlicht. Zusätzlich sind die messtechnisch erfassten Probeneigenschaften aufgeführt. Mit der rechteckigen Vorschubgeometrie werden geringfügig niedrigere Widerstände R<sub>F</sub> erreicht, während die Massendifferenz  $\Delta m$  deutlich höher ausfällt, was auf Nachteile im Hinblick auf die Bildung von Schweißauswürfen hindeutet. Während die elliptische Vorschubgeometrie zu einer rechteckigen Fügezonengeometrie führt, bildet sich beim rechteckigen Vorschub eine kugelförmige Fügezone aus. Dies wird auf ein größeres Volumen aufgeschmolzenem Materials zurückgeführt, da in Folge der höheren Bahnlänge bei der rechteckigen Vorschubgeometrie ca. 12 % mehr Energie in die Fügestelle eingetragen wird. Weil sich die Widerstände der Fügezone  $R_F$  nicht maßgeblich unterscheiden, wird geschlossen, dass das zusätzlich aufgeschmolzene Volumen, das sich in Form einer Kugel auf der Werkstückoberfläche ansammelt, keinen positiven Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der Kontaktstellen aufweist.

Rechteck				Ellipse		
Laserleistung P <sub>L</sub>		7000 W	000 W Laserleistung P <sub>L</sub>			7000 W
Vorschubgeschwindigkeit f		1,0 m/s		Vorschubgeschwindigkeit f		1,0 m/s
Geometriebreite b <sub>S</sub>		0,5 mm		Geometriebreite b <sub>S</sub>		0,5 mm
Wiederholungen n <sub>G</sub>		20		Wiederholungen n <sub>G</sub>		20
Probeneigenschaften		200		Probeneigenschaften		
Widerstand R <sub>F</sub>	38,7 μΩ			Widerstand R <sub>F</sub>	39,6 μΩ	
Massendifferenz ∆m	5,0 mg			Massendifferenz ∆m	1,7 mg	E 12

Bild 53: Kontaktstelleneigenschaften in Abhängigkeit von der Vorschubgeometrie ( $s_F = 0 \text{ mm}$ ;  $l_S = 3,0 \text{ mm}$ ; Proben:  $b_L = 4,2 \text{ mm}$ ;  $h_L = 2,5 \text{ mm}$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S8])

Zur Vermeidung von Schweißfehlern am Nahtende wird die Laserleistung  $P_L$  linear über eine definierte Länge  $l_R$  auf einen Wert  $P_{R, Z}$  reduziert [199]. Dieser wird als prozentualer Anteil der Laserleistung PL angegeben. Im Anschluss werden Schliffbilder der Proben angefertigt und die Porosität am Nahtauslauf  $\varepsilon_N$  erfasst. Zu diesem Zweck ermittelt ein Bildverarbeitungsprogramm, welcher Anteil der Schliffebene, die sich ca. 2 mm unterhalb der Probenoberkante befindet, mit Poren bedeckt ist. Dabei finden, bezogen auf die Vorschubbewegung, die hinteren 1,5 mm der Probenfläche Berücksichtigung, da die Leistungsrampe nur in diesem Bereich zum Tragen kommt. Für die Versuche kommt ein vollfaktorieller Versuchsplan mit fünf Faktorstufen zum Einsatz. Die Abhängigkeit der Porosität  $\varepsilon_N$  und Massendifferenz Am von der Ausprägung der Leistungsrampe ist in den Diagrammen in Bild 54 dargestellt. Zusätzlich sind exemplarische Schliffbilder mit dem analysierten Bereich abgebildet. Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass für die Länge der Leistungsrampe l<sub>R</sub> kein eindeutiger Effekt auf die Porosität  $\varepsilon_N$  sowie die Massendifferenz  $\Delta m$  zu identifizieren ist. Im Gegensatz dazu zeigt sich, dass die Bildung von Auswürfen bei niedrigen Werten der Zielleistung  $P_{R, Z}$  reduziert wird. Die Porosität  $\varepsilon_N$  weist hingegen eine umgekehrte Abhängigkeit auf, was auf ein schnelleres Erstarren der Schmelze zurückgeführt wird.



Bild 54: Beeinflussung der Porosität  $\varepsilon_N$  und Massendifferenz  $\Delta m$  durch Leistungsrampen (P<sub>L</sub> = 7000 W; Schweißbahnen: 3; s<sub>N</sub> = 0,5 mm; s<sub>F</sub> = 0 mm; l<sub>S</sub> = 3,8 mm; Proben: b<sub>L</sub> = 4,5 mm; h<sub>L</sub> = 2,36 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S9])

Bei der Reduktion der Laserleistung  $P_L$  am Nahtende ist zu berücksichtigen, dass auch die elektrischen Kontaktstelleneigenschaften beeinflusst werden. Die Auswertung in Bild 55 verdeutlicht, dass der Widerstand der Fügezone  $R_F$  mit abnehmenden Zielleistungen  $P_{R,Z}$  und zunehmenden Längen  $l_R$  ansteigt, wobei in den berücksichtigten Parameterbereichen die Länge der Leistungsrampe  $l_R$  den dominierenden Effekt aufweist.



Bild 55: Abhängigkeit des elektrischen Widerstands  $R_F$  von Leistungsrampen ( $P_L = 7000$  W; Schweißbahnen: 3;  $s_N = 0.5$  mm;  $s_F = 0$  mm;  $l_S = 3.8$  mm; Proben:  $b_L = 4.5$   $h_L = 2.36$  mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S9])

Die in Kapitel 2.4.3 vorgestellte zeitliche Leistungsmodulation wird in Versuchen auf das Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen angewendet, um den Einfluss auf die Widerstände der Fügezone R<sub>F</sub> sowie die Bildung von Auswürfen zu ermitteln. Dabei erfolgt eine Variation der Modulationsfrequenz f<sub>z</sub>, Vorschubgeschwindigkeit f und Amplitude A<sub>z</sub>, die in Bild 18 definiert werden. Im Hinblick auf den Fügezonenwiderstand R<sub>F</sub> verdeutlicht die Auswertung in Bild 56, dass auch beim Einsatz der zeitlichen Leistungsmodulation die Widerstände R<sub>F</sub> mit höheren Vorschubgeschwindigkeiten f zunehmen, was auf eine geringere Streckenenergie Es zurückzuführen ist. Unabhängig davon führen höhere Werte der Amplitude der Modulation A<sub>z</sub> sowie niedrigere Modulationsfrequenzen f<sub>z</sub> zu steigenden Widerständen im Kontaktbereich R<sub>F</sub>. [P16]



Bild 56: Einfluss der zeitlichen Leistungsmodulation auf den Kontaktstellenwiderstand R<sub>F</sub> und die Massendifferenz  $\Delta m$  (P<sub>L, m, z</sub> = 6500 W; s<sub>F</sub> = 0 mm; l<sub>S</sub> = 4,2 mm; Proben: b<sub>L</sub> = 4,2 mm; h<sub>L</sub> = 2,5 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [P16; S10])

Die Analyse des Einflusses der zeitlichen Leistungsmodulation auf die Bildung von Auswürfen zeigt, dass der Prozess in dieser Hinsicht größeren Unsicherheiten unterliegt. Dies äußert sich durch Unstetigkeiten in den ermittelten Verläufen der Massendifferenz  $\Delta m$ . Die Bildung von Auswürfen nimmt bei einer höheren Modulationsfrequenz f<sub>z</sub> ab, wobei die Amplitude A<sub>z</sub> einen geringeren Einfluss aufweist. Hingegen nimmt bei der kleineren Frequenz f<sub>z</sub> die Massendifferenz  $\Delta m$  bei höheren Amplituden A<sub>z</sub> ab.

In Kapitel 2.4.3 wird auch erläutert, dass die örtliche Leistungsmodulation beim Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoffen eine deutlich reduzierte Bildung von Schweißspritzern zur Folge hat. Um den Einfluss der in Bild 18 definierten Größen der Amplitude der Oszillation A<sub>ö</sub> sowie der Oszillationsfrequenz f<sub>ö</sub> im Kontext der Geometriegeschwindigkeit v<sub>G</sub> für den Anwendungsfall zu bestimmen, werden diese in Versuchen variiert. Die Auswertung der Versuchsergebnisse in Bild 57 verdeutlicht, dass die Amplitude A<sub>ö</sub> im betrachteten Parameterbereich nur einen geringen Einfluss auf den Widerstand R<sub>F</sub> und die Massendifferenz  $\Delta$ m hat. So zeigt der Mittelwertvergleich, dass bei einer größeren Amplitude A<sub>ö</sub> der Widerstand R<sub>F</sub> geringfügig erhöht und die Massendifferenz  $\Delta$ m etwas kleiner ausfällt.



Bild 57: Einfluss der zirkularen örtlichen Leistungsmodulation auf den Kontaktstellenwiderstand R<sub>F</sub> und die Massendifferenz  $\Delta m$  (P<sub>L</sub> = 7000 W; s<sub>F</sub> = 0 mm; l<sub>S</sub> = 4,2 mm; Proben: b<sub>L</sub> = 4,2 mm; h<sub>L</sub> = 2,5 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [P16; S10])

Für die Geometriegeschwindigkeit  $v_G$  zeigen sich die gleichen Abhängigkeiten, die in Bild 43 für die Vorschubgeschwindigkeit f ermittelt werden. So steigt der Widerstand R<sub>F</sub> mit der Geometriegeschwindigkeit v<sub>G</sub>, wohingegen die Massendifferenz  $\Delta m$  tendenziell abnimmt. Mittlere Einstellwerte der Oszillationsfrequenz f<sub>ö</sub> führen zu erhöhten Widerständen R<sub>F</sub> und verringerten Massendifferenzen  $\Delta m$ . [P16]

Da beim Schweißen der Probe in einer Richtung die Einschweißtiefe tw am Nahtende deutlich höher als am Beginn ausfällt, erfolgt in den folgenden Versuchen am Probenende eine Umkehr des Laserstrahls, wodurch sich dieser zurück zum Ausgangspunkt bewegt. Auf Basis der Erkenntnisse der vorausgegangenen Versuchsreihe wird für die lineare und zirkulare örtliche Leistungsmodulation ein statistischer Versuchsplan realisiert, um Wechselwirkungen zwischen den Prozessparametern berücksichtigen zu können. In diesem wird die Laserleistung P<sub>L</sub> einbezogen, die Amplitude A<sub>ö</sub> hingegen nicht berücksichtigt. Durch die mathematische Minimierung der Massendifferenz Am und des Widerstands der Fügezone R<sub>F</sub> werden mit den so aufgebauten Modellen Parameterkombinationen für beide Arten der örtlichen Leistungsmodulation bestimmt. Dabei zeigt sich, dass für beide Varianten unterschiedliche Parameter zu wählen sind, um optimierte Prozessergebnisse zu erzielen. In Bild 58 sind die ermittelten Einstellungen sowie die Ergebnisse der Analyse von 30 Musterteilen für jede der Oszillationsarten dargestellt. Dabei stellt die Box den Bereich des 25 %- bis 75 %-Perzentils sowie das arithmetische Mittel dar, der Whisker das 10 %und 90 %-Perzentil. Außerdem ist der Maximal- und Minimalwert als Stern eingezeichnet.



Bild 58: Vergleich der linearen und zirkularen örtlichen Leistungsmodulation ( $s_F = 0$  mm; Proben:  $b_L = 4,2$  mm;  $h_L = 2,5$  mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S8])

Die Auswertung der Versuche verdeutlicht, dass sich bei der zirkularen örtlichen Leistungsmodulation ein Schmelzbad über die komplette Werkstückoberfläche ausbildet, wohingegen sich dieses bei der linearen Leistungsmodulation trotz gleicher Amplitude  $A_{\ddot{o}}$  auf den Bereich der Fuge beschränkt. Bedingt durch die Unterschiede in der Geometriegeschwindigkeit  $v_G$  zeigt die lineare örtliche Leistungsmodulation niedrigere Widerstände  $R_F$ , aber auch höhere Massendifferenzen  $\Delta m$ , was auf den rapiden Richtungswechsel der Dampfkapillare zurückzuführen ist.

#### 5.2.2 Auswirkung maschinengebundener Einflussgrößen

Im Ursache-Wirkungs-Diagramm in Bild 19 wird neben dem Strahltaillendurchmesser  $d_o$  auch das Intensitätsprofil als relevante maschinenabhängige Einflussgröße für die Kontaktierung im Verfahren des Laserstrahlschweißens identifiziert. Erfolgt eine Veränderung des Abstands zwischen Fokussieroptik und Werkstückoberfläche aus der Fokusebene hinaus, vergrößert sich der Radius des Laserstrahls w. Dieser Vorgang wird als Defokussierung bezeichnet, wobei der Abstand zwischen Werkstückoberfläche und Fokusebene die Fokuslage  $p_F$  darstellt.



Bild 59: Strahlkaustik und Einfluss der Fokuslage  $p_F$  auf den Widerstand der Kontaktzone  $R_F$  und die Massendifferenz  $\Delta m$  ( $P_L = 7000$  W; f = 70 mm/s; Schweißbahnen: 3;  $P_{L, N} = 4200$  W;  $s_N = 0.5$  mm;  $s_F = 0$  mm;  $l_S = 4.5$  mm; Proben:  $b_L = 4.5$  mm;  $h_L = 2.36$  mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S5])

Für die zur Kontaktierung eingesetzten fasergeführten Festkörperlaser verändert sich bei einer Defokussierung die Intensitätsverteilung [161]. Zur Ermittlung der Abhängigkeit des Prozessergebnisses von der Fokuslage p<sub>F</sub> wird diese in Versuchen systematisch variiert. Negative Werte stellen eine Positionierung der Fokusebene im Werkstück, positive Einstellungen über der Werkstückoberfläche dar. Um die Veränderung der Intensitätsverteilung und des Radius des Strahls w berücksichtigen zu können, zeigt Bild 59 die an den Versuchspunkten gemessene Strahlkaustik zusammen mit den Prozessergebnissen. Für den Widerstand des Fügebereichs R<sub>F</sub> zeigt sich, dass die Messwerte mit zunehmenden Beträgen der Fokuslage p<sub>F</sub> größer werden. Dabei wird sichtbar, dass eine Verschiebung der Fokusebene in das Werkstück zunächst keine Veränderung der elektrischen Eigenschaften mit sich bringt. Die Entstehung von Auswürfen verläuft entgegengesetzt. So erreicht die Massendifferenz  $\Delta m$  ihr Minimum bei hohen Werten der Fokuslage.

Durch die Variation des Strahltaillendurchmessers  $d_o$  wird die Laserleistung auf eine geänderte Brennpunktfläche  $A_B$  fokussiert, was eine Veränderung der Intensität  $I_L$  zur Folge hat. Da zum Tiefschweißen von Kupferwerkstoffen Intensitäten  $I_L$  im Bereich von  $10^3$  W/mm<sup>2</sup> bis  $10^5$  W/mm<sup>2</sup> notwendig sind wird geschlossen, dass dies einen wesentlichen Einfluss auf die Kontaktierung von Formspulenwicklungen aufweist [244].

Um die Abhängigkeit zu untersuchen, erfolgt mit den in Anhang 2 beschriebenen Leitern der Höhe h<sub>L</sub> 2,5 mm und Breite b<sub>L</sub> 4,2 mm die Herstellung von Musterteilen mit Lasersystemen, die unterschiedliche Strahltaillendurchmesser d<sub>o</sub> aufweisen. Dabei werden die verbleibenden Parameter des Prozesses auf gleichbleibende Werte eingestellt. Den Einfluss des Fokusdurchmessers d<sub>o</sub> auf die elektrischen Eigenschaften sowie die Massendifferenz  $\Delta m$  fasst Bild 60 zusammen. Aus dem direkten Vergleich geht hervor, dass deutlich niedrigere Widerstände der Fügezone R<sub>F</sub> in Folge der höheren Intensität der Laserstrahlung I<sub>L</sub> erzielt werden. Die Streuung der elektrischen Eigenschaften ist beim Strahltaillendurchmesser d<sub>o</sub> von 255 µm am geringsten. Auch die Absolutwerte sowie Streuung der Massendifferenz  $\Delta m$  fallen bei dieser Einstellung am niedrigsten aus. Es wird geschlussfolgert, dass die Dampfkapillare bei den Strahltaillendurchmessern d<sub>o</sub> von 170 µm und 340 µm in Folge der hohen bzw. niedrigen Laserintensität I<sub>L</sub> instabiler ist.



Bild 60: Beeinflussung des Kontaktierungsprozesses durch den Strahltaillendurchmesser do ( $P_L = 6000$  W;  $v_G = 75$  mm/s; Vorschubstrategie: örtliche Leistungsmodulation;  $A_{\ddot{o}} = 1,25$  mm;  $f_{\ddot{o}} = 1000$  Hz;  $s_F = 0$  mm;  $l_S = 4,2$  mm; Proben:  $b_L = 4,2$  mm;  $h_L = 2,5$  mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S9; S11])

#### 5.2.3 Wirkbeziehungen zwischen Prozessergebnis und Werkstückbeschaffenheit

Im Ursache-Wirkungs-Diagramm in Bild 19 werden unter der Kategorie Material alle Eigenschaften der zu verbindenden rechteckigen Leiter zusammengefasst, die einen Einfluss auf das Prozessergebnis der Kontaktierung aufweisen. Hierzu gehört insbesondere die Leitergeometrie. DIN EN 60317-0-2 legt für Wickeldrähte mit rechteckigen Ouerschnitten fest, dass der Ouotient aus Leiterbreite bi zu Leiterhöhe hi innerhalb des Intervalls von 8,0 bis 1,4 liegen soll [75]. Um zu beurteilen, wie sich die Abmessungen der zu kontaktierenden Leiter auf den Fügeprozess auswirken, werden Musterteile bei einer gleichbleibenden Leiterbreite bi von 4,5 mm und variierenden Leiterhöhe h<sub>L</sub> hergestellt. Die Versuche bilden einen Bereich des Quotienten  $b_L$  zu  $h_L$  von 5,6 bis 1,4 ab, die dafür eingesetzten Versuchsmaterialien sind in Anhang 2 spezifiziert. Um die erzielbaren elektrischen Eigenschaften der Kontaktstellen vergleichen zu können, wird für die Versuchsteile der relative Fügezonenwiderstand R<sub>rel</sub> nach Gleichung 8 bestimmt, indem der Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> durch den Widerstand des unbeeinflussten Leiters R<sub>11</sub> gleicher Messlänge geteilt wird. Die Verdeutlichung der Ermittlung der Messwerte erfolgt in Anhang 5.

$$R_{rel} = \frac{R_F}{R_u} \tag{8}$$

Die elektrischen Kontaktstelleneigenschaften sowie die Entstehung von Auswürfen für die unterschiedlichen Leitergeometrien sind in Bild 61 dargestellt. Um die Ergebnisse der unterschiedlichen Leitergeometrien vergleichen zu können, erfolgt die Sortierung nach der auf die Leiterhöhe hL bezogenen Streckenenergie Es der Vorschublinie im Fugenbereich. Zur Einstellung der Werte in den Versuchen beträgt die Laserleistung PL konstant 7000 W, während die Vorschubgeschwindigkeit f angepasst wird. Die Diagramme zeigen, dass sich bei niedrigen Verhältnissen der Streckenenergie Es zur Leiterhöhe hu die relativen Widerstände Rrel der unterschiedlichen Leiterabmessungen innerhalb einer Spannweite von ca. 9 % befinden. Diese verdoppelt sich bei größer werdenden Werten auf ca. 18 %, wobei der relative Widerstand R<sub>rel</sub> mit zunehmenden Leiterhöhen h<sub>L</sub> abnimmt. Die optische Analyse der Kontaktstellen zeigt, dass Leiter mit einem höheren Verhältnis der Breite b<sub>L</sub> zur Höhe h<sub>L</sub> stärker zur Bildung kugelförmiger Kontaktstellen neigen. Damit geht ein Abkippen des Schmelzbads von der Leiteroberfläche einher.



Bild 61: Erzielbare relative Fügezonenwiderstände R<sub>rel</sub> und Massendifferenzen  $\Delta$ m bei varierenden Leitergeometrien (P<sub>L</sub> = 7000 W; Schweißbahnen: 3; P<sub>L, N</sub> = 4200 W; s<sub>N</sub> = 0,5 mm; s<sub>F</sub> = 0 mm; l<sub>S</sub> = 4,5 mm; Proben: b<sub>L</sub> = 4,5 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S12])

Die Massendifferenz  $\Delta m$  wächst in Übereinstimmung mit den in Bild 44 dargestellten Ergebnissen mit zunehmender Streckenenergie E<sub>S</sub>. Dabei wirkt sich insbesondere der große Anstieg der Streckenenergie E<sub>S</sub> bei Leitern mit einem geringeren Verhältnis der Breite b<sub>L</sub> zur Höhe h<sub>L</sub> aus.

In Kapitel 4 wird die These hergeleitet, dass Isolationsrückstände den Laserstrahlschweißprozess flachleiterbasierter Formspulenwicklungen negativ beeinflussen. Zur Evaluierung werden Musterteile mit Lackrückständen im Fügebereich hergestellt, die durch die in Kapitel 4.1 validierte Fluoreszenzmessung quantifiziert werden. Dabei wird zur Einstellung definierter Lackrückstände der in Kapitel 4.2.2 analysierte laserbasierte Abtragsprozess herangezogen, wobei durch Vorgabe von Zielwerten für die Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> auf Basis der Prozessmodelle, die benötigten Abtragsparameter festgelegt werden. Im Anschluss erfolgt ein Verschweißen von jeweils zwei Leitern mit ähnlichen Fluoreszenzintensitäten IF. Die resultierenden Widerstände der Fügezone RF sowie die Massendifferenzen Δm sind in Bild 62 als Punkte eingetragen. Zusätzlich werden die als Polynom zweiten Grades bestimmten Anpassungslinien in das Diagramm eingetragen. Dabei erklärt die Anpassungsfunktion des Widerstands R<sub>F</sub> 72 % der Streuung der Messwerte, die der Massendifferenz  $\Delta m$  78 %. Eine weitergehende Analyse der Polynome ergibt, dass diese einen annähernd parallelen Verlauf aufweisen. Dies untermauert das Ergebnis einer Korrelationsanalyse mit dem Korrelationskoeffizienten r von 0,76. Hieraus ist abzuleiten, dass zwischen der Massendifferenz Am und dem Widerstand der Fügezone RF ein direkter Zusammenhang besteht.



Bild 62: Widerstand R<sub>F</sub> und Massendifferenz  $\Delta m$  in Abhängigkeit von der Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> (P<sub>L</sub> = 7000 W; f = 70 mm/s; Schweißbahnen: 3; P<sub>L, N</sub> = 4200 W; s<sub>N</sub> = 0,5 mm; s<sub>F</sub> = 0 mm; l<sub>s</sub> = 4,2 mm; Proben: b<sub>L</sub> = 4,5 mm; h<sub>L</sub> = 2,36 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S<sub>3</sub>])

Die eingetragenen gestrichelten Linien unterteilen den betrachteten Bereich der Fluoreszenzintensität IF in drei Abschnitte. Für Fluoreszenzintensitäten bis 10 RFU ist kein merklicher Anstieg des Widerstands RF sowie der Massendifferenz  $\Delta m$  festzustellen. Die optische Analyse zeigt, dass zwischen 1 RFU und 6 RFU Verbrennungsrückstände unterhalb des Fügebereichs zunehmen und sich im Bereich des Nahtendes eine Auswölbung bildet. Auf dem Schliffbild mit niedriger Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> sind keinerlei Poren zu erkennen, bereits bei einer leichten Zunahme der Isolationsreste bilden sich vornehmlich im unteren Nahtbereich feine Poren. Für Fluoreszenzintensitäten IF von 10 RFU bis 100 RFU steigen sowohl die Widerstände R<sub>F</sub> als auch Massendifferenzen  $\Delta m$  sowie deren Streuungen an. Zunächst weisen die Werkstücke nach dem Schweißprozess unterhalb der Fügezone stärker werdende Verbrennungsrückstände auf. Die Auswölbung am Nahtende ist stärker ausgeprägt und in diesem Bereich sind erste feine oberflächliche Fehlstellen zu erkennen. Bei Fluoreszenzintensitäten I<sub>F</sub> von 80 RFU haften zusätzlich zu den Verbrennungsrückständen geschmolzene Isolationsreste an den Proben an. Außerdem weist auch die Schweißnaht oberflächliche Verbrennungsrückstände und eine Vielzahl an Oberflächenfehlern auf. In der Schliffanalyse in Bild 62 sind große Poren sowie eine geringere Einschweißtiefe tw zu erkennen. Am Ende des betrachteten Bereichs der Fluoreszenzintensität IF, ab Werten von 100 RFU, stabilisieren sich der Widerstand R<sub>F</sub> und die Massendifferenz  $\Delta m$  auf einem hohen Niveau. Die optische Analyse zeigt, dass das erstarrte Schmelzevolumen deutlich abgenommen hat, was auf die Entstehung starker Auswürfe hindeutet. Dies belegt auch das Schliffbild, das zusätzlich große oberflächliche Löcher im Nahtbereich zeigt.

Die Einkopplung der Laserstrahlung in die Fügezone erfolgt über die Schnittfläche der Leiter, wobei das Absorptionsverhalten maßgeblich von der Oberflächenrauheit beeinflusst wird [166]. Aus diesem Grund ist abzuleiten, dass das Prozessergebnis bei der Kontaktierung von Formspulenwicklungen mit infraroten Lasern von dieser Größe abhängt. Zur Herstellung von Musterteilen mit reproduzierbaren Oberflächenrauheiten werden Leiter der Höhe  $h_L$  von 2,36 mm und Breite  $b_L$  von 4,5 mm mit der in Anhang 9 vorgestellten Trennvorrichtung geschnitten. Um eine Beeinflussung der Oberfläche durch den Abtragsprozess zu vermeiden, erfolgt das Trennen nach dem Entfernen der Isolation. Da ein Scherschneidprozess zum Einsatz kommt, sind in der Schnittfläche ein Bruch- sowie Glattschnittanteil zu erkennen [245]. Um die Oberflächeneigenschaften der Schnittfläche zu variieren, wird der Schneidspalt der Trennvorrichtung  $s_T$ gezielt geändert. Im Schweißprozess erfolgt die Anordnung der Leiter so, dass die Bruchflächen zur Fuge ausgerichtet sind, weswegen die Einkopplung der Laserstrahlung in diesem Bereich stattfindet. Zur messtechnischen Erfassung der Oberflächenrauheit wird die gemittelte Rauhtiefe Rz des Bruchbereichs gemessen. In Bild 63 wird der Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> sowie die Massendifferenz  $\Delta m$  in Abhängigkeit der gemittelten Rauhtiefe Rz mit den zugehörigen Ausgleichsgeraden dargestellt.



Bild 63: Widerstand R<sub>F</sub> und Massendifferenz  $\Delta m$  in Abhängigkeit von der gemittelten Rauhtiefe Rz (P<sub>L</sub> = 6000 W; f = 70 mm/s; Schweißbahnen: 3; P<sub>L, N</sub> = 3600 W; s<sub>N</sub> = 0,5 mm; s<sub>F</sub> = 0 mm; l<sub>S</sub> = 4,5 mm; Proben: b<sub>L</sub> = 4,5 mm; h<sub>L</sub> = 2,36 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S13; S14])

Die statistische Analyse der Messwerte zeigt, dass zwischen der gemittelten Rauhtiefe Rz der Oberfläche, an der die Laserstrahlung eingekoppelt wird, und dem Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> sowie der Massendifferenz  $\Delta m$  lineare Zusammenhänge bestehen. Während die Bildung von Schweißspritzern und Auswürfen mit zunehmender Oberflächenrauheit abnimmt, nehmen die Widerstände R<sub>F</sub> zu. Aus den Messdaten wird geschlossen, dass der Absorptionsgrad  $\alpha$  mit steigenden gemittelten Rauhtiefen Rz abnimmt. Dies spiegelt sich in höheren Werten des Widerstands R<sub>F</sub> wieder. Aus dem geringeren Energieeintrag resultiert, in Übereinstimmung mit den in Bild 43 dargestellten Ergebnissen, der Rückgang von Schweißspritzern und Auswürfen.

Das aufschmelzbare Kupfervolumen der Leiter im Fügebereich wird von der Geometrie der Leiterenden bestimmt. Da das Leiterende mit einer umlaufenden Fase versehen ist, ist der Einfluss eines Schnittgrats vernachlässigbar. Im Rahmen der Versuchsdurchführung werden Musterteile mit variierenden Fasen herangezogen und deren Geometrie messtechnisch erfasst. Diese setzt sich aus der in Bild 64 dargestellten Breite b<sub>F</sub>, Höhe h<sub>F</sub> sowie Tiefe t<sub>F</sub> der Fase zusammen. In den Diagrammen ist die Abhängigkeit des Fügestellenwiderstands  $R_F$  von den geometrischen Eigenschaften der Fase dargestellt. Da für den Massenverlust  $\Delta m$  keine Wirkbeziehung zu identifizieren ist, erfolgt keine Darstellung der Versuchsergebnisse. Die Fase vergrößert an der Stirnfläche der Werkstücke den Fügespalt  $s_F$  um die Tiefe der Fase  $t_F$ , wobei diese Erhöhung linear über die Fasenhöhe  $h_F$  abgebaut wird. Wegen ihrer geringen Höhe  $h_F$  im Bereich von 1 mm, bezogen auf die erzielten Einschweißtiefen  $t_w$  oberhalb von 4 mm, wird nicht erwartet, dass sich die Fase wie eine Erhöhung des Fügespalts  $s_F$  auswirkt. Hingegen zeigt die Auswertung in Bild 59, dass eine entsprechende Verschiebung der Fokusebene aus der Werkstückoberfläche einen geringen Anstieg des Widerstands in der Fügezone  $R_F$  erwarten lässt. Dies ist zu berücksichtigen, da die Energieeinkopplung im Fasenbereich erfolgt.



Bild 64: Einfluss der Einführfasengeometrie auf den Fügezonenwiderstand R<sub>F</sub> (P<sub>L</sub> = 5500 W; f = 70 mm/s; Schweißbahnen: 3; P<sub>L, N</sub> = 4200 W; s<sub>N</sub> = 0,5 mm; s<sub>F</sub> = 0 mm; l<sub>S</sub> = 4,5 mm; Proben: b<sub>L</sub> = 4,5 mm; h<sub>L</sub> = 2,36 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S13])

In den Diagrammen wird neben den erfassten Messpunkten auch die zugehörige Ausgleichsgerade dargestellt. Eine zunehmende Tiefe der Fase  $t_F$ hat im berücksichtigten Wertebereich abnehmende Widerstände  $R_F$  zur Folge. Dies wird darauf zurückgeführt, dass das von den um s<sub>N</sub> (o,5 mm) versetzten Nebenbahnen aufgeschmolzene Material besser über die Fase in die Fuge fließt, wodurch der Anbindungsquerschnitt A<sub>K</sub> wächst. Hingegen verursacht eine Zunahme der Fasenhöhe h<sub>F</sub> wachsende Widerstände des Fügebereichs R<sub>F</sub>. Hieraus wird geschlossen, dass sich das fehlende Materialvolumen in Kombination mit der zunehmenden Verschiebung der Werkstückoberfläche aus der Ebene der Strahltaille negativ auf das Schweißergebnis auswirkt. Die Messdaten für die Breite der Fase b<sub>F</sub> zeigen hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften. Dies deckt sich mit dem in Bild 47 zusammengefassten Ergebnis, dass eine Verkürzung der Länge der Schweißgeometrie l<sub>S</sub> in bestimmten Bereichen keine merkliche Erhöhung des Widerstands R<sub>F</sub> zur Folge hat. So liegt die Veränderung des Widerstands R<sub>F</sub> auf Grundlage der ermittelten Ausgleichsgerade in der berücksichtigten Spannweite mit 0,21 µ $\Omega$  unterhalb der Messunsicherheit des Messmittels von ±0,53 µ $\Omega$ .

In Kapitel 3 wird identifiziert, dass der Oxidationszustand der Leiteroberfläche, mit der die Laserstrahlung in Wechselwirkung tritt, den Schweißprozess beeinflusst. So wird in Folge einer Erhöhung des Absorptionskoeffizienten α erwartet, dass höhere Einschweißtiefen t<sub>w</sub> und niedrigere Widerstände des Fügebereichs R<sub>F</sub> erzielt werden [167]. Zur Überprüfung, ob diese Abhängigkeit auch beim Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen einen signifikanten Einfluss aufweist, werden Proben in einem Ofenprozess bei einer Temperatur  $\theta_0$  von 200 °C für unterschiedliche Zeitabschnitte in einer Atmosphäre aus Luft oxidiert. Im Anschluss werden in gleicher Weise behandelte Leiter miteinander verschweißt, sodass sich je Oxidationszustand zwölf Proben ergeben. Um den Einfluss der Oberflächenrauheit auf das Schweißergebnis zu minimieren, werden die Proben unter gleichbleibenden Bedingungen mit der in Anhang 9 vorgestellten Trennvorrichtung geschnitten. Der Schneidprozess erfolgt nach dem Entfernen der Lackisolation, um eine Beeinflussung der Schnittfläche durch den Abtragsprozess zu vermeiden.

Die zur Einkopplung der Laserstrahlung relevanten Schnittflächen der Proben in den drei Oxidationsstufen unterscheiden sich merklich in ihrer Farbe. Zur genaueren Beurteilung werden von den Schnittflächen, unter gleichbleibenden Beleuchtungsbedingungen, mit einem Auflichtmikroskop Aufnahmen angefertigt. Für den Bruchbereich, mit dem die Laserstrahlung in den Versuchen wechselwirkt, wird der Mittelwert des Rot-, Grün- und Blauanteils des RGB-Farbraums bestimmt, wie Bild 65 dokumentiert. Es zeigt sich, dass die ermittelten Werte mit zunehmender Oxidation abnehmen, woraus geschlossen wird, dass ein Zusammenhang besteht.



Bild 65: Analyse des RGB-Farbraums der Bruchfläche für die Oxidationsstufen (Ofen:  $\theta_0 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Proben:  $b_L = 4,5 \text{ mm}$ ;  $h_L = 2,36 \text{ mm}$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S14])

Den Einfluss der Ofenoxidation auf den Widerstand der Kontaktstelle R<sub>F</sub> sowie die Bildung von Auswürfen ist in Bild 66 zusammengefasst. Die Messdaten jeder berücksichtigten Einstellung umfassen zwölf Teile. Dabei gibt die Box den Bereich des 25 %- bis 75 %-Perzentils sowie das arithmetische Mittel an, während der Whisker das 10 %- und 90 %-Perzentil markiert. Außerdem sind die Maximal- und Minimalwerte eingezeichnet.



Bild 66: Prozessergebnis in Abhängigkeit der Oxidationsdauer ( $P_L = 7000 \text{ W}$ ; f = 70 mm/s; Schweißbahnen: 3;  $P_{L, N} = 4200 \text{ W}$ ;  $s_N = 0.5 \text{ mm}$ ;  $s_F = 0 \text{ mm}$ ;  $l_S = 4.5 \text{ mm}$ ; Proben:  $b_L = 4.5 \text{ mm}$ ;  $h_L = 2.36 \text{ mm}$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S14])

Der Widerstand des Fügebereichs R<sub>F</sub> der Oxidationsstufen unterscheidet sich kaum. Einzig die Streuung nimmt mit zunehmender Oxidation leicht ab, wohingegen die Bildung von Auswürfen leicht zunimmt. Zur Überprüfung, ob sich die aus jeweils zwölf Musterteilen bestehenden Gruppen im

Hinblick auf ihren arithmetischen Mittelwert sowie die Varianz unterscheiden, werden diese statistisch analysiert. Die beiden einfachen ANOVA-Analysen, welche die Gleichheit der Gruppenmittelwerte für die Widerstände  $R_F$  sowie die Massendifferenzen  $\Delta m$  beurteilen, fallen mit p-Werten von 0,97 bzw. 0,44 positiv aus. Das bedeutet, dass sich die Mittelwerte für die Oxidationsstufen unter Berücksichtigung der Streuung nicht unterscheiden lassen. Auch ein analog durchgeführter Test auf gleiche Varianzen hat zum Ergebnis, dass sich die Streuungen der Gruppen nicht unterscheiden. Folglich wird abgeleitet, dass die in den Versuchen berücksichtigten Oxidationsgrade den Laserstrahlschweißprozess von Formspulenwicklungen nicht signifikant beeinflussen. Dies wird damit begründet, dass die Oxidschicht bei den hohen eingesetzten Laserintensitäten I<sub>L</sub> unmittelbar abgesprengt wird, wodurch der Einfluss des durch Oxidation veränderten Absorptionsgrades  $\alpha$  des Festkörpers in den Hintergrund tritt.

# 5.2.4 Wechselwirkung der Positionierung der Formspulenenden

In der SIPOC-Analyse in Bild 21 wird identifiziert, dass die Positionierung der Formspulenenden einen wesentlichen Einfluss auf den Fügeprozess hat, was auch von Gäbler bestätigt wird [103]. Um diese Abhängigkeit zu analysieren, werden Musterteile unter Zuhilfenahme der in Anhang 4 vorgestellten Spannvorrichtung mit definierten Lageabweichungen in den drei rotativen und translatorischen Achsen zueinander aufgespannt und verschweißt. Zur Realisierung der Abweichungen erfolgt eine Verdrehung bzw. Verschiebung der beiden Werkstücke zueinander. Dabei werden Rotationen bei beiden Werkstücken in entgegengesetzter Richtung durchgeführt. Weil sich die Ausbildung des Schmelzbads bei den beiden Prozessvarianten mit linearer Schweißbahn sowie zirkularer örtlicher Leistungsmodulation unterscheidet, wird erwartet, dass Lageabweichungen verschiedene Auswirkungen aufweisen. Aus diesem Grund werden beide Fälle in Bild 67 bis Bild 69 in eigenen Kurven abgebildet. Die Massendifferenz Am wird nicht in die Grafiken aufgenommen, da unter Berücksichtigung des 95 %-Vertrauensbereichs der Messwerte keine signifikanten Abhängigkeiten von Lageabweichungen identifiziert werden können.

Der lineare Versatz in x-Richtung wirkt sich direkt in Form des Fügespalts  $s_F$  aus. Für beide Strahlführungsstrategien zeigt sich, dass der Widerstand  $R_F$  mit zunehmenden Werten annähernd linear ansteigt. Dies wird darauf zurückgeführt, dass das aufgeschmolzene Materialvolumen den zunehmenden Abstand zwischen den Leitern auffüllt, was zu einem geringeren

Anbindungsquerschnitt A<sub>K</sub> führt. Bei der linearen Vorschubgeometrie kann für einen Versatz oberhalb von 0,5 mm keine Kontaktstelle ausgebildet werden, was bei örtlicher Leistungsmodulation erst ab Verschiebungen oberhalb von 0,7 mm eintritt. Dies ist mit der höheren Menge an aufgeschmolzenem Material bei Strahloszillation zu begründen. Im Hinblick auf die Rotation eines Werkstücks um die x-Achse zeigt Bild 67, dass sich für den betrachteten Winkelbereich keine Veränderung des Widerstands R<sub>F</sub>, die über die Unsicherheit des Messmittels hinausgeht, ergibt. Daher wird geschlossen, dass die Fügeanordnung für diese Art der Verkippung wenig anfällig ist, weswegen auf die Durchführung von Versuchen mit zirkularer örtlicher Leistungsmodulation verzichtet wird.



Bild 67: Widerstand des Kontaktbereichs R<sub>F</sub> in Abhängigkeit des Fügespalts s<sub>F</sub> sowie bei Rotation um die x-Achse (P<sub>L</sub> = 7000 W; l<sub>S</sub> = 4,2 mm; linearer Vorschub: f = 70 mm/s; Strahloszillation:  $A_{\tilde{o}}$  = 1,25 mm; f<sub> $\tilde{o}$ </sub> = 1000 Hz; v<sub>G</sub> = 25 mm/s; Proben: b<sub>L</sub> = 4,2 mm; h<sub>L</sub> = 2,5 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S6])

Bei Verschiebung eines Leiters in y-Richtung nehmen die Widerstände des Kontaktbereichs R<sub>F</sub> zu, wobei die Änderung bei linearer Vorschubgeometrie stärker ausfällt, was auf das geringere Volumen der erzeugten Schmelze zurückgeführt wird. Eine Verkippung der Werkstücke durch Rotation um die y-Achse führt im Vergleich zu deutlich stärkeren Anstiegen des Widerstands R<sub>F</sub>, wobei eine Strahloszillation keine Vorteile zeigt, wie aus Bild 68 hervorgeht. Dieses Verhalten wird damit begründet, dass die erzeugte Schmelze zunächst den entstehenden Hinterschnitt umfließen muss, um den sich aufweitenden Raum zwischen den Leitern aufzufüllen. Da die Fließgeschwindigkeiten begrenzt sind, wird der Einfluss eines höheren Schmelzevolumens reduziert.



Bild 68: Widerstand des Kontaktbereichs  $R_F$  in Abhängigkeit des linearen Versatzes in y-Richtung sowie bei Rotation um die y-Achse ( $P_L = 7000 \text{ W}$ ;  $s_F = 0 \text{ mm}$ ;  $l_S = 4,2 \text{ mm}$ ; linearer Vorschub: f = 70 mm/s; Strahloszillation:  $A_{\ddot{o}} = 1,25 \text{ mm}$ ;  $f_{\ddot{o}} = 1000 \text{ Hz}$ ;  $v_G = 25 \text{ mm/s}$ ; Proben:  $b_L = 4,2 \text{ mm}$ ;  $h_L = 2,5 \text{ mm}$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S6])

Der translatorische Versatz der beiden Leiter entlang der z-Achse führt dazu, dass die Werkstückoberflächen in unterschiedlichen Ebenen liegen, weswegen sich für mindestens eines der Werkstücke die Fokuslage p<sub>F</sub> verändert. In den Versuchen erfolgt die Einkopplung des Lasers in der Strahltaille über die Oberfläche des tieferliegenden Leiters.



Bild 69: Widerstand des Kontaktbereichs  $R_F$  in Abhängigkeit des linearen Versatzes in z-Richtung sowie bei Rotation um die z-Achse ( $P_L = 7000 \text{ W}$ ;  $s_F = 0 \text{ mm}$ ;  $l_S = 4,2 \text{ mm}$ ; linearer Vorschub: f = 70 mm/s; Strahloszillation:  $A_{\ddot{o}} = 1,25 \text{ mm}$ ;  $f_{\ddot{o}} = 1000 \text{ Hz}$ ;  $v_G = 25 \text{ mm/s}$ ; Proben:  $b_L = 4,2 \text{ mm}$ ;  $h_L = 2,5 \text{ mm}$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S6])

Bild 69 verdeutlicht, dass sich die Lageabweichung zunächst durch einen geringfügigen Anstieg des Widerstands im Kontaktbereich R<sub>F</sub> auswirkt, bevor nur unwesentliche Veränderungen auftreten. Dies gilt für beide Vorschubgeometrien. Daher wird geschlossen, dass unter der zuvor erläuterten Prämisse zur Einkopplung der Laserstrahlung eine Verschiebung in

z-Richtung keinen signifikanten Einfluss auf das Schweißergebnis aufweist. Auch die Verdrehung eines Leiters um die z-Achse wirkt sich für beide Vorschubgeometrien erst ab Winkeln oberhalb von 6° auf den Widerstand R<sub>F</sub> aus.

#### 5.2.5 Auswirkung des Einsatzes von Prozessgasen

Liebl und Franco identifizieren in ihren Untersuchungen, dass der Einsatz der Prozessgase Argon oder Helium beim Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoffen einen positiven Einfluss hat. So wird durch beide Schutzgase die Bildung von Auswürfen reduziert und bei der Verwendung von Argon die Qualität der Nahtoberfläche verbessert. [185; 193]

Zur Validierung, ob durch Prozessgase auch beim Kontaktierungsprozess von Formspulenwicklungen Vorteile erschlossen werden können, werden jeweils 30 Proben ohne Prozessgas, mit Argon sowie mit Helium hergestellt und deren elektrische Eigenschaften beurteilt. Zusätzlich erfolgt die Erfassung der Bildung von Auswürfen. Die Zuführung der Prozessgase erfolgt durch zwei an der Fokussieroptik angebrachte Düsen, die so ausgerichtet werden, dass sich die zu fügenden Werkstücke direkt im Gasstrom befinden. Der Druck der Prozessgase p<sub>P</sub> wird auf 2,5 bar eingestellt. Das verwendete Helium weist eine Reinheit von 99,999 %, das Argon von 99,998 % auf [246; 247]. Für die Versuche kommen die in Anhang 2 beschriebenen Leiter der Höhe h<sub>L</sub> von 2,36 mm und der Breite b<sub>L</sub> von 4,5 mm zum Einsatz.



Bild 70: Beeinflussung des Kontaktierungsprozesses durch Prozessgase ( $P_L = 7000 \text{ W}$ ; f = 70 mm/s; Schweißbahnen: 3;  $P_{L,N} = 4200 \text{ W}$ ;  $s_N = 0.5 \text{ mm}$ ;  $s_F = 0 \text{ mm}$ ;  $l_S = 4.5 \text{ mm}$ ; Proben:  $b_L = 4.5 \text{ mm}$ ;  $h_L = 2.36 \text{ mm}$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S9])

Zur Auswertung werden in Bild 70 Boxplots des Fügezonenwiderstands  $R_F$  sowie der Massendifferenz  $\Delta m$  dargestellt, die auf jeweils 30 Versuchen beruhen. Diese zeigen neben dem arithmetischen Mittel die Bereiche zwischen dem 25 %- und 75 %-Perzentil an. Die Whisker verdeutlichen das

10 %- und 90 %-Perzentil, wobei zusätzlich die maximal und minimal auftretenden Werte eingetragen sind.

Die optische Analyse zeigt, dass die ohne Prozessgas kontaktierten Probekörper im Fügebereich die stärksten von Oxidation hervorgerufenen Verfärbungen aufweisen. Der Mittelwert des Widerstands  $R_F$  unterscheidet sich für die drei Versuchsreihen kaum, am niedrigsten ist er bei den Experimenten ohne Prozessgas. Hingegen nimmt die Streuung der Messwerte beim Einsatz von Schutzgasen zu und ist bei Helium am größten.

Wie aus den Probenfotos hervorgeht, neigen die unter Schutzgasatmosphäre geschweißten Proben zum Einfall der Fügezone am Nahtbeginn, der in den Probenfotos hinten liegt. Der Einsatz von Argon senkt den Mittelwert der Massendifferenz  $\Delta m$  um ca. 10 %, der von Helium um ca. 30 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Prozessgase die Oxidation der Kupferschmelze unterdrücken, was sich durch eine höhere Oberflächenspannung auswirkt [185]. Der signifikantere Effekt von Helium kann damit begründet werden, dass Helium die Wärmeleitung erhöht und somit das Schmelzbad stärker kühlt [248]. Auch dies erhöht die Oberflächenspannung des Schmelzbads, die mit zunehmender Temperatur  $\theta_m$  abnimmt [249].

### 5.3 Zusammenfassung und Fazit der Prozessuntersuchungen

Die in Kapitel 5 durchgeführten Untersuchungen beantworten die Forschungsfrage, welche wechselseitigen Beziehungen zwischen den Prozessgrößen, der Werkstückbeschaffenheit und den erzielbaren Prozessergebnissen für die betrachteten Werkstücke und Parameterbereiche vorliegen. So werden in Simulationsstudien die Temperaturverteilungen in den Werkstücken für verschiedene Kombinationen aus der Laserleistung P<sub>L</sub> und Vorschubgeschwindigkeit f ermittelt. Aus dem Vergleich mit der für das Isolationsmaterial zulässigen Wärmeschocktemperatur  $\theta_s$  ist abzuleiten, auf welcher Leiterlänge die Isolation abzutragen ist, um Isolationsschäden zu vermeiden. Dabei zeigt sich, dass insbesondere bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten f die Isolation von größeren Leiterbereichen abzutragen ist.

Zur Beurteilung der Qualität des Prozessergebnisses stellt die Messung des Widerstands im Bereich der Schweißnaht  $R_F$  ein geeignetes Mittel dar. In diesem Kontext wird nachgewiesen, dass zwischen dem erfassten Widerstand  $R_F$  und der Einschweißtiefe tw ein linearer Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten r von -0,94 besteht. Da neben den elektrischen Eigenschaften auch die Bildung von Auswürfen eine wichtige Zielgröße zur Prozessoptimierung darstellt, wird diese in den Untersuchungen durch die Ermittlung der Massendifferenz  $\Delta m$  quantifiziert. Der Widerstand R<sub>F</sub> des Fügebereichs nimmt mit einer gesteigerten Laserleistung P<sub>L</sub> ab, während dieser mit zunehmenden Vorschubgeschwindigkeiten f höher ausfällt. Die Bildung von Auswürfen wird durch eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit f über 100 mm/s signifikant gesenkt, wohingegen höhere Laserleistungen P<sub>L</sub> die Bildung von Schweißspritzern und Auswürfen begünstigen. Für die abgeleitete Größe der Streckenenergie E<sub>S</sub> gilt, dass bei gleichbleibenden Werten die Kombination höhere Laserleistungen P<sub>L</sub> mit schnelleren Vorschubbewegungen niedrigere Kontaktstellenwiderstände R<sub>F</sub> hervorruft. Dieser Effekt wird auf die hohe Wärmeleitung des Kupferwerkstoffes zurückgeführt.

Zur Vermeidung von Nahteinfällen ist ein größeres Schmelzevolumen zu erzeugen. Mit diesem Ziel wird die Vorschubbewegung um zwei weitere Schweißbahnen erweitert. Dabei erreicht ein Versatz  $s_N$  um o,6 mm, in Kombination mit einer Leistung der Nebenbahnen  $P_{L, N}$  von 60 %, niedrigere Widerstände  $R_F$  bei einer Zunahme der Massendifferenz  $\Delta m$ . In Abhängigkeit der Länge der Vorschubbewegung  $l_S$  treten Schäden an der verbleibenden Isolation auf. Um diese zu vermeiden, wird die Vorschubbahn auf 75 % der Leiterbreite  $b_L$  reduziert, ohne dass die Bildung von Auswürfen sowie der Widerstand der Fügezone  $R_F$  maßgeblich verändert wird. Auch mittels mehrfach durchgeführter rechteckiger bzw. elliptischer Vorschubgeometrien dehnt sich das Schmelzbad auf die komplette Leiteroberfläche aus. Bildet sich allerdings in Folge des hohen Schmelzevolumens eine kugelförmige Fügezone aus, weist dies keinen Vorteil im Hinblick auf die elektrischen Kontaktstelleneigenschaften auf.

Durch den Einsatz programmierbarer Fokussieroptiken zur Kontaktierung von Formspulenwicklungen variiert die Position der Werkstücke im Bearbeitungsfeld. Mit größer werdenden Auslenkungen nehmen die Absolutwerte sowie Standardabweichungen  $\sigma$  des Widerstands R<sub>F</sub> zu, wobei dieser Effekt für die beiden Achsen unterschiedlich stark ausfällt.

Um Poren und Auswürfe zu reduzieren, wird der Einfluss von Leistungsrampen am Nahtende auf das Schweißergebnis untersucht. Ein Abrampen der Laserleistung auf niedrige Zielwerte P<sub>R, Z</sub> reduziert die Entstehung von Auswürfen, wobei die Porosität  $\varepsilon_N$  auf niedrigem Niveau zunimmt. Für die Länge der Leistungsrampe l<sub>R</sub> ist keine entsprechende Abhängigkeit anzuführen. Da sich die Widerstände R<sub>F</sub> mit zunehmenden Längen l<sub>R</sub> und abnehmenden Zielleistungen  $P_{R,Z}$  erhöhen, wobei die Länge der Leistungsrampe dominiert, bringt eine schnelle und starke Reduktion der Laserleistung am Nahtende Vorteile mit sich. Eine weitere Möglichkeit die Bildung von Auswürfen zu reduzieren, stellt die zeitliche und örtliche Leistungsmodulation dar. Beim Einsatz einer zeitlichen Leistungsmodulation verschlechtern sich die elektrischen Eigenschaften mit wachsenden Modulationsamplituden Az und abnehmenden Modulationsfrequenzen fz. Dabei nimmt die Massendifferenz  $\Delta m$  mit einer Zunahme der beiden Parameter ab. Ein deutlicherer Effekt wird mit der örtlichen Leistungsmodulation erzielt, wobei die zirkulare Modulation Vorteile gegenüber der linearen aufweist. Die Amplitude A<sub>ö</sub> weist einen geringen Einfluss auf den Prozess auf, wohingegen Oszillationsfrequenzen f<sub>ö</sub> im Bereich von 1000 Hz die Bildung von Auswürfen signifikant reduzieren. Dies geht allerdings mit ansteigenden Widerständen R<sub>F</sub> einher.

Die Veränderung der Fokuslage beeinflusst sowohl die elektrischen Eigenschaften als auch die Entstehung von Auswürfen. Dabei wachsen die Widerstände RF mit zunehmenden Verschiebungen der Fokusebene von der Werkstückoberfläche, während die Massendifferenzen Am abnehmen. Da moderate Verschiebungen der Fokusebene in das Werkstück die elektrischen Eigenschaften nicht signifikant verändern, sind diese als vorteilhaft einzustufen. Bei sonst gleichen Rahmenbedingungen werden mit geringeren Strahltaillendurchmessern do niedrigere Werte des Widerstands RF erreicht. Diese unterliegen allerdings einer gesteigerten Streuung, was auch für zunehmende Durchmesser d<sub>o</sub> gilt. In Kombination mit der deutlich erhöhten Bildung von Auswürfen wird sichtbar, dass sich vom Referenzprozess ausgehend gesteigerte und verringerte Intensitäten der Laserstrahlung IL negativ auf die Prozessstabilität auswirken. Der Quotient der Streckenenergie Es zur Leiterhöhe hL stellt zur Abschätzung geeigneter Vorschubgeschwindigkeiten f bei variierenden Leiterabmessungen eine Möglichkeit dar. Mit abnehmenden Höhen hu des Drahtes nimmt die Wahrscheinlichkeit der Bildung kugelförmiger Kontaktstellen zu, was die Erzielung niedriger relativer Kontaktstellenwiderstände R<sub>rel</sub> erschwert. Der Einsatz von Leitern mit großen Höhen hL geht mit einer stärkeren Entstehung von Schweißspritzern und Auswürfen einher, was aus der Notwendigkeit des Einsatzes einer höheren Streckenenergie Es im Fügeprozess zurückgeführt wird.

Die Untersuchungen belegen, dass zwischen den elektrischen Eigenschaften sowie der Bildung von Auswürfen und der Qualität des Lackabtrags ein Zusammenhang besteht. Dabei rufen bereits geringe Isolationsrückstände Poren in der Schweißnaht hervor, wobei der Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> sowie die Entstehung von Schweißspritzern und Auswürfen ab Fluoreszenzintensitäten I<sub>F</sub> von ca. 10 RFU signifikant zunehmen. Neben einer Verunreinigung der Fügezone wirkt sich auch die Oberflächenrauheit auf das Fügeergebnis aus. So nimmt der Absorptionsgrad  $\alpha$  mit abnehmenden gemittelten Rauhtiefen Rz ab, wobei die Entstehung von Schweißspritzern und Auswürfen zunimmt. Da hierbei der Effekt der Abnahme der Massendifferenz dominiert, ist die Einkopplung der Laserstrahlung an Bruchflächen hoher Rauheit zu bevorzugen.

Sind die zu fügenden Leiterenden mit einer Einführfase versehen, wirkt sich eine zunehmende Fasenhöhe h<sub>F</sub> durch wachsende Widerstände R<sub>F</sub> aus, wohingegen eine gesteigerte Tiefe der Fase t<sub>F</sub> eine Reduktion zur Folge hat. Die berücksichtigten Oxidationsgrade der Leiteroberflächen zeigen hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Fügeprozess, was mit einem unmittelbaren Absprengen der Oxidschicht in Folge der hohen Laserintensität I<sub>L</sub> begründet wird. Die zu verbindenden Leiter unterliegen im Fügeprozess Lageabweichungen zueinander. In diesem Kontext wirken sich insbesondere eine Rotation um die y-Achse sowie ein linearer Versatz entlang der x-Achse, was einen zunehmenden Fügespalt zur Folge hat, negativ auf die elektrischen Eigenschaften der Kontaktstelle aus. Die Entstehung von Auswürfen wird hingegen nicht signifikant beeinflusst.

Die Prozessgase Helium und Argon reduzieren die Entstehung von Auswürfen, wobei der Effekt bei Helium signifikanter ist. Dies wird auf die kühlende Wirkung des Prozessgases zurückgeführt. Hingegen werden die elektrischen Eigenschaften geringfügig negativ beeinflusst, da die Widerstände einer gesteigerten Streuung unterliegen. Die beste Oberflächenqualität lässt sich ebenfalls mit Helium erzielen, dennoch werden die Vorteile des Einsatzes von Prozessgasen als gering bewertet.

Die in diesem Kapitel durchgeführten Prozessuntersuchungen schaffen ein umfassendes Prozessverständnis. Dieses beantwortet die zweite Forschungsfrage, welche wechselseitigen Beziehungen es zwischen den Prozessgrößen, der Werkstückbeschaffenheit und den erzielbaren Kontaktstelleneigenschaften bei der Kontaktierung von Formspulenwicklungen unter Einsatz infraroter Laser gibt.

# 6 Auslegung und Benchmark des laserbasierten Fügeprozesses

Basierend auf den vorausgegangenen Untersuchungen werden geeignete Prozessparameter für den Laserstrahlschweißprozess zur Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen abgeleitet. Dieser Referenzprozess wird im Anschluss im Hinblick auf die Entstehung von Auswürfen, die mechanische und elektrische Kontaktstellenqualität sowie die Dauerfestigkeit der Verbindung beurteilt. Darüber hinaus erfolgt auf dieser Basis ein Vergleich mit alternativen Fügetechnologien für das vorliegende Anwendungsszenario. Um die in Kapitel 5.2.3 und 5.2.4 beschriebenen Einflüsse der Positionierung und Werkstückeigenschaften auf den Kontaktierungsprozess zu umgehen, werden die Musterteile unter gleichbleibenden Bedingungen vorbereitet und ohne Lageabweichung zueinander positioniert. In den vorausgegangenen Untersuchungen wird die programmierte Schweißbahn und die Lage der Fuge mittels einer geeigneten Positionierung der Werkstücke unter der Fokussieroptik in Deckung gebracht. Da allerdings davon auszugehen ist, dass die Lage der Fügestelle in x- und y-Richtung bezogen zur Bearbeitungsoptik Schwankungen unterliegt, kommt ein automatisches System zur Anpassung der Schweißposition in der Bearbeitungsebene zum Einsatz. Das beim Anbieter TRUMPF verfügbare System besteht aus einer Kamera inklusive Bildverarbeitung und kommuniziert mit der Steuerung des Lasers, wodurch die Lage der Vorschubbewegung auf Basis detektierter Werkstückkanten angepasst werden kann [250]. Das Vision-System sowie die eingesetzten Prozessparameter verdeutlicht Bild 71.

Vision-System
---------------



Prozessparameter	
Brennfleckdurchmesser d <sub>B</sub>	255 µm
Laserleistung P <sub>L</sub>	7000 W
Geometriegeschwindigkeit v <sub>G</sub>	125 mm/s
Oszillationsfrequenz $f_{\ddot{o}}$	1000 Hz
Amplitude Oszillation $A_{\ddot{o}}$	1,25 mm
Länge Schweißgeometrie ls	2,8 mm
Fügespalt s <sub>F</sub>	o mm
Länge Leistungsrampe l <sub>R</sub>	300 µm
Zielleistung Leistungsrampe $P_{R, Z}$	o %

Bild 71: Eingesetztes Vision-System und Referenzparameter

Für den Schweißprozess wird eine örtliche zirkulare Leistungsmodulation verwendet. Es erfolgt eine Umkehr der Laserbewegung am Probenende, sodass der Laserstrahl zurück zum Ausgangspunkt fährt, wo die Vorschubbewegung endet. Im Auslauf der Vorschubgeometrie wird die Laserleistung mit einer kurzen Rampe stark reduziert.

## 6.1 Verifizierung des Referenzprozesses

Um sicherzustellen, dass die Kontaktstelle die identische Stromtragfähigkeit wie der unbeeinflusste Leiter aufweist, muss die Anbindungsfläche  $A_{K}$ mindestens der Querschnittsfläche des unbeeinflussten Leiters AL entsprechen. Für den analysierten Draht wird der tatsächliche Leiterquerschnitt AL, die Höhe des Leiters hL sowie dessen Breite bL in Schliffbildern bestimmt. Dabei ergeben sich A<sub>L</sub> zu 9,93 mm<sup>2</sup>, b<sub>L</sub> zu 4,21 mm und h<sub>L</sub> zu 2,45 mm [P13]. Unter der Annahme, dass die Schweißnaht keine Poren sowie eine gleichbleibende Einschweißtiefe tw aufweist, berechnet sich diese aus der ermittelten Leitergeometrie zu 2,36 mm, um sicherzustellen, dass der Anbindungsquerschnitt A<sub>K</sub> dem Leiterquerschnitt A<sub>L</sub> entspricht. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Breite der Schweißnaht bw bei den ausgewählten Referenzparametern der Leiterbreite b<sub>L</sub> entspricht. Auf Basis des Ersatzschaltbilds in Bild 40 wird der Sollwert des Widerstands der Fügezone  $R_{F, soll}$  hergeleitet, der 45,31 µ $\Omega$  beträgt. Dabei findet der spezifische Widerstand  $\rho_{el}$  für kaltumgeformtes Cu-ETP bei 20 °C von 0,017  $\Omega$ mm<sup>2</sup>/m nach [233] Verwendung.

Unter den im Kapitel 6 beschriebenen Rahmenbedingungen werden mit dem analysierten Kupferlackdraht 30 Musterteile hergestellt und im Hinblick auf die Entstehung von Auswürfen und den Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> untersucht. Zusätzlich erfolgt die in Anhang 6 beschriebene Bestimmung der mechanisierten Schälfestigkeit F<sub>S, max</sub>.

Die Ergebnisse dokumentieren die Histogramme in Bild 72. Mit einer Statistiksoftware durchgeführte Tests ergeben, dass die Messdaten des Widerstands der Fügezone R<sub>F</sub> sowie der mechanisierten Schälfestigkeit F<sub>S, max</sub> der Normalverteilung folgen. Die Werte der Massendifferenz  $\Delta m$  weisen diese Verteilung hingegen erst nach Durchführung einer Johnson-Transformation auf, weswegen zur Auswertung die transformierten Daten herangezogen werden.



Bild 72: Analyse der Maschinenfähigkeit des Referenzprozesses (Proben:  $b_L = 4,2$  mm;  $h_L = 2,5$  mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S5])

Darüber hinaus erfolgt die Beurteilung der Maschinenfähigkeit C<sub>mk</sub> für die drei Zielgrößen. Zu deren Bestimmung sei auf einschlägige Fachliteratur, z.B. [207], hingewiesen. Unter Berücksichtigung der oberen Spezifikationsgrenze R<sub>F, soll</sub> ergibt sich für den Widerstand R<sub>F</sub> eine Maschinenfähigkeit C<sub>mk</sub> von 2,67. Daraus wird sichtbar, dass der Fügeprozess im Hinblick auf die erzielbaren Widerstände R<sub>F</sub> typisch geforderten Fähigkeitswerten C<sub>mk</sub>, wie z.B. 1,33, genügt [203]. Da für die aus Auswürfen resultierende Massendifferenz  $\Delta$ m keine Vorgabe verfügbar ist, wird die obere Spezifikationsgrenze so bestimmt, dass sich eine minimale Maschinenfähigkeit C<sub>mk</sub> von 1,33 ergibt. Folglich ist der Referenzprozess dann als fähig zu bewerten, wenn Auswürfe entsprechend der Massendifferenz  $\Delta$ m von mindestens 59 mg zugelassen werden. Das Gleiche gilt für den Anwendungsfall im Hinblick auf die mechanisierte Schälfestigkeit F<sub>S, max</sub>, weswegen zum Erreichen der Maschinenfähigkeit C<sub>mk</sub> von 1,33 die untere Spezifikationsgrenze von 75 N abgeleitet wird.

Auf die gleiche Weise hergestellte Kontaktstellen werden, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, Umweltbelastungen ausgesetzt, um Aussagen über deren Zuverlässigkeit treffen zu können. 15 Proben durchlaufen die in Anhang 7 beschriebene Temperaturschockprüfung in 350 Zyklen, wobei der Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> in definierten Abständen messtechnisch erfasst wird. Die Entwicklung des Widerstands R<sub>F</sub> in Abhängigkeit der Anzahl der Temperaturzyklen zeigt Bild 73. Um die Veränderung zu verdeutlichen, gibt die linke Skala die Werte bezogen auf den Mittelwert der Messwerte des Ausgangszustands bei o Zyklen an. Die Box verdeutlicht den Bereich des 25 %- bis 75 %-Perzentils sowie das arithmetische Mittel des Widerstands R<sub>F</sub>, der Whisker das 10 %- und 90 %-Perzentil. Außerdem ist der Maximal- und Minimalwert als Stern eingezeichnet. Der Mittelwert des Widerstands R<sub>F</sub> erhöht sich während der 350 Zyklen um ca. 0,75 %, wobei die größte Veränderung zwischen dem 100. und 150. Zyklus auftritt. Da sich die Veränderung im Bereich der Unsicherheit des Messsystems zur Erfassung des Widerstands R<sub>F</sub> befindet, wird für die durchlaufene Belastung keine signifikante Beeinflussung der Kontaktstelle identifiziert.



Bild 73: Veränderung des Widerstands  $R_F$  im Temperaturschocktest (Proben:  $b_L = 4,5$  mm;  $h_L = 2,36$  mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S9])

Bild 74 verdeutlicht die Erhöhung des Widerstands der Fügezone R<sub>F</sub> während der in Anhang 8 beschriebenen temperaturüberlagerten Vibrationsbelastung bei 15 Probekörpern. Dabei erfolgt die Erfassung des Widerstands R<sub>F</sub> jeweils nach der Belastung in den angegebenen Vibrationsprofilen und Raumrichtungen. Es ist zu beachten, dass sich beim Einsatz der Kontaktstellen in einem Stator zusätzliche Spannungen aus Biege- und Montageprozessen auf die Lebensdauer auswirken können. Zur Auswertung werden neben dem arithmetischen Mittelwert des Widerstands R<sub>F</sub> der Bereich des 25 %- bis 75 %-Perzentils sowie die maximal und minimal auftretenden Messwerte als Stern und der Bereich zwischen dem 10 %- und 90 %-Perzentil dargestellt. Um die Veränderung zu verdeutlichen, gibt die linke Achse den Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> bezogen auf den Mittelwert der Ausgangsgruppe an.



Bild 74: Veränderung des Widerstands der Fügezone R<sub>F</sub> in Folge von Vibrationsbelastungen (Proben:  $b_L$  = 4,5 mm;  $h_L$  = 2,36 mm; Cu-ETP) (Messdaten: [S9])

Die Auswertung der Veränderung zeigt, dass die Erhöhung der Widerstände der Fügezone RF bei einer Vibrationsbelastung in Richtung der v-Achse am größten ausfällt. Es ergibt sich eine mittlere Erhöhung des Widerstands der Kontaktstelle R<sub>F</sub> um ca. 2,8 %, wobei auch die Streuung der Messwerte zunimmt. Die maximal auftretende Veränderung beträgt ca. 11,0 %. Eine ANOVA-Analyse bestätigt mit einem p-Wert von 0,02, wodurch die Nullhypothese gleicher Mittelwerte verworfen wird, dass sich die Widerstände R<sub>F</sub> durch die Vibrationsbelastung signifikant erhöhen. Es ist abzuleiten, dass die Kontaktstellen durch die mechanische Belastung geschädigt werden, ohne dass ein Bruch der Kontaktstellen auftritt. Die metallographische Analyse in Bild 75 belegt, dass sich, ausgehend von großen Poren im unteren Bereich der Fügezone, Risse ausbilden, auf die die Widerstandserhöhung zurückgeführt wird. Folglich ist die Dauerfestigkeit im Hinblick auf Vibrationsbelastungen bei Proben, die Poren aufweisen, herabgesetzt. Dies geht, wie Bild 62 belegt, unter anderem mit einem unzureichenden Isolationsabtrag einher.



Bild 75: Entstehung von Rissen bei Vibrationsbelastung (Schliffebene: y-z)

### 6.2 Technologischer und wirtschaftlicher Vergleich mit alternativen Fügeverfahren

Zum Benchmark des in Kapitel 6.1 betrachteten Referenzprozesses für die Kontaktierung von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen im Laserstrahlschweißverfahren werden Musterteile mit alternativen Fügeverfahren hergestellt und im Anschluss unter Berücksichtigung der erzielbaren elektrischen und mechanischen Eigenschaften gegenübergestellt. Hierbei finden die Alternativtechnologien des Ultraschallschweißens, Widerstandspressschweißens sowie Widerstandshartlötens Berücksichtigung, die in Kapitel 2.3.1 erläutert werden. In Vorversuchen erfolgt für jede der betrachteten Technologien die Ermittlung geeigneter Prozessparameter, um die Leiter der Abmessungen b<sub>L</sub> von 4,2 mm und h<sub>L</sub> von 2,5 mm zu fügen. Die Musterteile werden gemäß Anhang 2 vorbereitet, sodass die Lackisolation bereits vor dem Fügeprozess entfernt ist. Die eingesetzten Prozessparameter sind in Anhang 10 zusammengefasst. Bild 76 stellt die Ergebnisse der Fügetechnologien gegenüber, indem sie den maximal und minimal auftretenden Messwert als Stern, das 25 %- sowie 75 %-Perzentil und im Whisker die Spannweite des 10 %- bis 90 %-Perzentils, abbildet. Außerdem sind die einzelnen Messpunkte und die abgeleitete Normalverteilung eingetragen.



Bild 76: Gegenüberstellung elektrischer und mechanischer Verbindungseigenschaften alternativer Kontaktierungstechnologien (Proben:  $b_L = 4,2 \text{ mm}$ ;  $h_L = 2,5 \text{ mm}$ ; Cu-ETP) (Messdaten: [S5; S11])

Aus Bild 76 geht hervor, dass sich sowohl die erzielbaren Mittelwerte als auch Streuungen der Widerstände  $R_F$  und der mechanisierten Schälfestigkeit  $F_{S, max}$  unterscheiden. Die Anbindungsfläche  $A_K$  wird beim Widerstandshartlöten im betrachteten Fall, neben der Leiterbreite  $b_L$ , von der Länge des zugeführten Folienlots  $l_{Lot}$  bestimmt und beträgt 5 mm. Hingegen ergibt sich der Anbindungsquerschnitt  $A_K$  beim Ultraschallschweißen und Widerstandspressschweißen aus der von den Werkzeugen überdeckten Länge des Leiters  $l_{L,W}$ , die in den Versuchen ca. 8 mm beträgt. Während sich für den Prozess des Laserstrahlschweißens, dessen Anbindungsfläche  $A_K$  aus der Einschweißtiefe  $t_W$  resultiert, der höchste Mittelwert für den Widerstand der Fügezone  $R_F$  ergibt, werden die niedrigen Werte des Widerstandhartlötens auf eine große Anbindungsfläche  $A_K$  in Folge einer weiteren Verteilung des flüssigen Lots zurückgeführt. Beim Vergleich der Streuung der erzielten Widerstände  $R_F$  wird deutlich, dass der Prozess des Laserstrahlschweißens mit einer Standardabweichung  $\sigma$  von 1,5 % der geringsten Streuung unterliegt. Hingegen weist das Widerstandshartlöten mit der Standardabweichung  $\sigma$  von 8,1 % die größte Streuung auf.

Die im Widerstandspressschweißen hergestellten Proben brechen in Folge der starken Leitereinschnürung im Randbereich der Fügezone, was zu niedrigen mechanisierten Schälfestigkeiten F<sub>S, max</sub> führt. Hingegen versagen die Proben der drei alternativen Technologien entlang des Fügebereichs. Während sich die Mittelwerte der mechanisierten Schälfestigkeit kaum unterscheiden, weist das Ultraschallschweißen eine deutlich erhöhte Streuung auf.

Die Messdaten verdeutlichen, dass der betrachtete Kupferlackdraht nach dem Abtrag der Isolation im Fügebereich mit allen vier betrachteten Prozesstechnologien kontaktiert werden kann. Allerdings lässt die alleinige Betrachtung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften keine Rückschlüsse auf die praktische Anwendbarkeit der Prozesstechnologien zur Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen zu, da Aspekte, wie die Entstehung von Isolationsschäden, eine Einschnürung der Leiter im Kontaktbereich oder der Platzbedarf, nicht abgebildet werden. Aus diesem Grund erfolgt ein weiterer Vergleich der Prozesstechnologien. Beim Widerstandshartlöten werden in Folge eines hohen Energieeintrags thermische Schäden an der Isolation detektiert, was unzulässige Kurzschlüsse hervorrufen kann. Beim Ultraschallschweißen ist eine leichte Verformung und beim Widerstandspressschweißen eine starke Verformung im Kontaktbereich zu erkennen. Da beide Verfahren sehr große Anbindungsflächen AK erzielen, gleicht die Parallelschaltung der Leiter in den durchgeführten Versuchen die Querschnittsreduktion in der Fügezone bei der durchgeführten Ermittlung des Widerstands im Fügebereich R<sub>F</sub> aus. Dennoch kann die Reduktion des Leiterquerschnitts lokal erhöhte thermische Verluste hervorrufen. Für die werkzeuggebundenen Verfahren bestätigt sich der in Bild 16 identifizierte Nachteil, dass durch das mechanische Anfahren an die Fügestelle ausreichend Raum für die Werkzeuge verfügbar sein muss. Außerdem sind die damit einhergehenden Positionierzeiten zu berücksichtigen. Da das Laserstrahlschweißen das einzige Schmelzschweißverfahren darstellt, besteht nur bei dieser Technologie die Gefahr der Entstehung von Auswürfen, was als Nachteil zu betrachten ist. Die erläuterten Aspekte des technologischen Vergleichs werden in Tabelle 9 zusammengefasst.

	Laserstrahl- schweißen	Ultraschall- schweißen	Widerstands- pressschweißen	Widerstandshart- löten
exemplarisches Prozessergebnis				
elektrische Eigenschaften	0	0	-	+
mechanische Eigenschaften	0	0	-	+
Isolations- schäden	+	+	+	-
Verengung Leiter- querschnitt	+	0	-	+
Platzbedarf im Wickelkopf	+	-	-	0
Entstehung Auswürfe	-	+	+	+
Prozessdauer t <sub>Pr</sub>	0,22 S	≈ 1,40 S*	3,60 s *nicht reproduzierbar	2,02 S + gut o neutral - schlecht

Tabelle 9: Gegenüberstellung alternativer Kontaktierungstechnologien

Die gegenübergestellten Prozesstechnologien unterscheiden sich neben deren technologischen Eigenschaften auch in den Kosten, die diese bei der Kontaktierung von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen verursachen. Zum wirtschaftlichen Vergleich der Kontaktierungsverfahren wird ein Stator mit offener Formspulenwicklung konzipiert und die Kosten der Kontaktierung in Abhängigkeit der jährlichen Produktionsmenge in Bild 77 dargestellt. Die dafür getroffenen Annahmen fasst Anhang 11 zusammen. Der Stator weist 60 Nuten auf, in denen sich übereinanderliegend jeweils vier Seiten offener Formspulen befinden. Ohne die Berücksichtigung von Sonderelementen ergeben sich für den betrachteten Stator 117 Kontaktstellen. Die Wicklung wird aus dem im technologischen Vergleich verwendeten Kupferlackdraht der Leiterhöhe bL von 4,2 mm und Leiterhöhe hL von 2,5 mm hergestellt. In die wirtschaftliche Analyse fließen neben den Investitionskoten auch die Kosten für den Werkzeugverschleiß und -wechsel,
die Energiekosten sowie die Materialkosten ein. Die Summe der Investitionskosten umfasst dabei die vollautomatisierte Kontaktierungsstation inklusive Prozesstechnik, Achsen, Einhausung, Werkstückhandhabung und -aufnahme sowie Spannmittel. Bei Erreichen der Kapazitätsgrenze der Kontaktierungsstation wird diese dupliziert.



Bild 77: Kosten der Kontaktierung eines Stators in Abhängigkeit der Produktionsmenge

Bei niedrigen Produktionsmengen zeigen die Verfahren des Ultraschallschweißens, Widerstandspressschweißens und Widerstandshartlötens deutliche Kostenvorteile gegenüber dem Laserstrahlschweißen. Dies ist auf die hohen Investitionskosten zur Realisierung des Laserstrahlschweißprozesses zurückzuführen. Allerdings fallen die Kontaktierungskosten je Stator für das Laserstrahlschweißen schnell, sodass es ab einer Produktionsmenge von ca. 2000 Statoren/ Jahr die kostengünstigste Alternative darstellt. Hier haben neben dem Wegfallen von Kosten für Werkzeuge die moderaten Energiekosten und die hohe erzielbare Ausbringungsmenge einen positiven Einfluss.

## 6.3 Zusammenfassung von Potenzialen des Laserstrahlschweißens von Formspulenwicklungen

Auf Grundlage der in Kapitel 5 durchgeführten Untersuchungen wird ein Referenzprozess abgeleitet, der auf einer örtlichen Leistungsmodulation basiert. Mit diesem werden reproduzierbar hinreichende elektrische Eigenschaften erzielt, wobei im Mittel eine Massendifferenz  $\Delta$ m von 3,2 mg auftritt. Aus diesem Grund muss bei der Überführung des Prozesses in eine Serienproduktion eine Abschirmung der entstehenden Schweißspritzer und Auswürfe sichergestellt werden. Die mechanisierte Schälfestigkeit

F<sub>S. max</sub> erreicht einen Mittelwert von 278 N. Im Temperaturschocktest zeigt sich keine signifikante Veränderung der elektrischen Werkstückeigenschaften, wohingegen sich diese bei der temperaturüberlagerten Vibrationsbelastung, insbesondere wenn die Kontaktstelle Poren aufweist, merklich verschlechtern, ohne dass ein Bruch der Kontaktstelle auftritt. Zum Benchmark des Laserstrahlschweißens wird ein Vergleich mit dem Ultraschall-, Widerstandspressschweißen und Widerstandshartlöten durchgeführt. Hierbei weist das Laserstrahlschweißen die niedrigste Taktzeit und geringste Streuung der elektrischen Eigenschaften auf, ohne dass im Prozess der Leiterquerschnitt verengt und die Isolation der Wicklung beschädigt wird. Allerdings sind prinzipbedingt nur in diesem Prozess Auswürfe möglich. Mit Ausnahme des Widerstandspressschweißens erreichen die verglichenen Fügetechnologien ähnliche mechanisierte Schälfestigkeiten. Obwohl das Laserstrahlschweißen in Kombination seiner Eigenschaften als am vorteilhaftesten bewertet wird, stellen bei einer guten räumlichen Erreichbarkeit der Kontaktstelle das Ultraschallschweißen und bei einer hohen Toleranz gegenüber des Wärmeeintrags das Widerstandshartlöten technologische Alternativen dar.

Im wirtschaftlichen Vergleich der Kontaktierungsverfahren wird sichtbar, dass das Laserstrahlschweißverfahren insbesondere bei hohen Stückzahlen signifikante Kostenvorteile gegenüber den Alternativtechnologien aufweist. So liegen im analysierten Szenario die Kosten für die Kontaktierung eines Stators bei einer halben Million produzierter Einheiten im Jahr für das Laserstrahlschweißen bei ca. 0,45 EUR je Stator, während die Alternativtechnologien je Stator mit Kosten in Höhe von ca. 3,30 EUR bis 6,10 EUR einhergehen.

# 7 Prozessketten zur laserbasierten Kontaktierung von Formspulenwicklungen

Bei der Realisierung der hohen Anzahl an Kontaktstellen von Statoren mit offener Formspulenwicklung ist es zur wirtschaftlichen Herstellung notwendig, eine prozessstabile Kontaktierungstechnologie einzusetzen [P1]. Zur Anwendung des Laserstrahlschweißens mit infraroter Wellenlänge stellen die Kenntnisse der in Kapitel 5 ermittelten Wirkzusammenhänge die Grundlage zur Implementierung einer prozesssicheren Kontaktierung in der Fertigungskette dar. Diese ermöglichen es insbesondere prozesskettenübergreifende Wechselwirkungen zu berücksichtigen und mit geeigneten Gegenmaßnahmen die resultierende Streuung des Kontaktierungsprozesses zu reduzieren.

## 7.1 Prozesskettenübergreifende Abhängigkeiten des laserbasierten Kontaktierungsprozesses

Auf Grundlage der in Kapitel 5.2.1 dokumentierten Abhängigkeiten für die Prozessparameter kann der laserbasierte Kontaktierungsprozess gezielt beeinflusst werden. Eine Fixierung dieser Einflussgrößen auf feste Werte ermöglicht es bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen einen stabilen Fügeprozess zu realisieren. Im Umkehrschluss bietet die Anpassung der Prozessgrößen an sich verändernde, nicht direkt beeinflussbare Eingangsgrößen, das Potenzial, auf deren Streuungen zu reagieren. Hierbei stellt die Kenntnis der in Abschnitt 5.2.3 evaluierten Abhängigkeit des Prozessergebnisses von der Werkstückbeschaffenheit sowie der in Kapitel 5.2.4 untersuchten Positionierung der Formspulenenden zueinander die Grundlage dar. Da auch bezogen auf die in 5.2.2 untersuchten maschinengebundenen Einflussgrößen von gleichbleibenden Bedingungen auszugehen ist, wirkt sich die Strahlkaustik bei schwankenden Abständen der Werkstückoberfläche von der Bearbeitungsoptik auf das Prozessergebnis aus. Basierend auf dem in Bild 20 dargestellten Prozessablauf wird abgeleitet, dass die Positionierung der Formspulen, deren geometrische Eigenschaften sowie Oberflächenbeschaffenheit Störgrößen darstellen, die von vorgelagerten Prozessschritten beeinflusst werden.

# 7.1.1 Prozesskettenbedingte Positionsabweichungen der Formspulen

Aus der Positionierung der Formspulenenden resultiert neben der Lage der Fuge im Raum auch der Abstand der Werkstückoberfläche von der Bearbeitungsoptik sowie die Anordnung der zu fügenden Leiterenden zueinander. Da die Lage der Vorschubbahn im Raum durch das in Kapitel 6 eingesetzte optische System zuverlässig an die Leiter angepasst wird, werden Abweichungen automatisch ausgeglichen und sind zu vernachlässigen. Hingegen beeinflusst eine große Anzahl vorgelagerter Prozessschritte die Positionierung der Formspulenenden zueinander. Neben Geradheitsabweichungen aus dem Richtprozess wirken sich auch Längendifferenzen beim Trennen der Leiter sowie geometrische Abweichungen aus der Formgebung auf die Positionierung der Formspulenenden zueinander aus. Gleiches gilt für Deformationen und Lageabweichungen, die aus der Vormontage und Montage der Formspulen resultieren sowie Unregelmäßigkeiten beim radialen Biegen und Schränken. Wegen der hohen Anzahl an Einflussgrößen sowie der Wichtigkeit der Lage der Leiter zueinander für das Schweißergebnis ist für den Prozessschritt der Kontaktierung der Einsatz einer Spannvorrichtung, die Abweichungen ausgleicht, unabdingbar. Diese wird in axialer Richtung auf den Wickelkopf aufgesetzt und bringt die zu fügenden Leiterenden mittels Kavitäten in definierte Positionen. Um Positionstoleranzen auszugleichen und die Vorrichtung nach dem Fügeprozess entfernen zu können, werden die Kavitäten durch bewegliche Elemente erzeugt. Um nach dem Spannen verbleibende Positionsabweichungen abzuleiten, wird in Bild 78 ein Spannmechanismus für einen exemplarischen Stator mit einer zweilagigen offenen Formspulenwicklung konzipiert. Die Wicklung besteht aus dem in Kapitel 5.2.4 verwendeten Draht der Breite b<sub>L</sub> 4,2 mm und Höhe h<sub>L</sub> 2,5 mm. Die Isolation der Schichtstärke  $h_1$  von 93 µm ist auf einer Länge  $l_A$  von 10 mm entfernt.



Bild 78: Spannvorrichtung und Abschätzung maximaler Lageabweichungen

Der Spannmechanismus weist entlang des Umfangs verteilt angeordnete Abstandselemente (1) mit definierter Breite auf, deren Abstand zueinander der Leiterbreite b<sub>L</sub> entspricht. Die Elemente werden in radialer Richtung bewegt, sodass sie beim Einschieben in den Freiraum zwischen zwei Leiterpaaren diese bei Bedarf mit ihrer Fase (2) in tangentialer Richtung ausrichten. Auf diese Weise werden Verschiebungen der Leiterenden in v-Richtung ausgeglichen. Die Abstandselemente (1) sind 10 mm unterhalb der Leiteroberkante angeordnet. Der eigentliche Klemmmechanismus besteht aus jeweils zwei gegenüberliegenden Spannelementen (3) sowie einem dazwischen angeordneten Anschlag (4). Die Spannelemente (3) verfahren in radialer Richtung und pressen die Leiterpaare gegen den Anschlag (4), sodass die aufgebrachte Kraft den Fügespalt s<sub>F</sub> verkleinert. Da die Spannvorrichtung mit geringem Abstand unterhalb der Schweißzone angeordnet ist muss überprüft werden, ob sich diese im Fügeprozess erwärmt und im Umkehrschluss eine kühlende Wirkung auf die Werkstücke besitzt. Aus Tabelle 8 geht hervor, dass 10 mm unterhalb der Leiteroberkante, in Abhängigkeit der Prozessparameter, Maximaltemperaturen  $\theta_{W}$ max zwischen ca. 100 °C und 300 °C auftreten. Da in den Simulationen die maximale Werkstücktemperatur  $\theta_{W, max}$  an dieser Position zeitlich versetzt mitunter nach Ende des Schweißprozesses auftritt, wird geschlussfolgert, dass die Spannvorrichtung den Fügeprozess nicht maßgeblich beeinflusst.

Durch den Einsatz der Spannvorrichtung werden die linearen Positionsabweichungen in x- und y-Richtung sowie die aus Rotationen um die drei Raumachsen resultierenden Verkippungen bestimmt. Die maximal möglichen Positionsabweichungen für die Raumrichtungen sind in Bild 78 aufgelistet. Diese berechnen sich unter der Prämisse, dass die Abmessungen der Kupferleiter beim Lackabtrag unbeeinflusst bleiben und nach DIN EN 60317-0-2 die Leiterbreite b<sub>L</sub> eine Toleranz von 0,05 mm aufweist [75]. Außerdem wird die Annahme getroffen, dass der Abstand zwischen den Elementen zur Bestimmung der Lage der Leiter in y-Richtung 0,2 mm über dem Sollwert der Leiterbreite b<sub>L</sub> liegt, um ein Verklemmen zu vermeiden. Weitere Annahmen liegen darin, dass die Leiter im isolierten Bereich parallel verlaufen und die breiten Leiterseiten am Übergang zum abisolierten Bereich in Kontakt stehen. Für aus Rotationen resultierende Winkel wird vorausgesetzt, dass beide Leiter den gleichen Winkel aufweisen, um die Ergebnisse aus 5.2.4 übertragen zu können.

Da die Position in z-Richtung nicht durch die Spannvorrichtung bestimmt wird, ist eine analytische Ermittlung zugehöriger Abweichungen nicht möglich. Aus diesem Grund wird unter Laborbedingungen ein Demonstrator aufgebaut und der Versatz z der Leiter zueinander in z-Richtung sowie der z-Versatz des Leiterpaars bezogen auf die Oberkante des Blechpakets z<sub>L</sub> bei 36 Fügestellen bestimmt. Dabei beträgt das arithmetische Mittel des Versatzes z zwischen zwei zu fügenden Leitern 0,43 mm bei einer Spannweite von 1,27 mm. Die Position der Leiteroberkante bezogen auf das Blechpaket  $z_L$  liegt im Mittel bei 25,65 mm mit einer Spannweite von 4,14 mm.

Um die aus der Variation der Position der Leiter zueinander resultierende Streuung des Kontaktierungsprozesses beurteilen zu können, werden für die sechs betrachteten Abweichungen Verteilungen bestimmt. Für Größen, die sich aus dem Werkzeug ergeben, erfolgt die Simulation von Messwerten. Zu diesem Zweck werden innerhalb der minimal und in Bild 78 hergeleiteten maximal möglichen Abweichung auf einer Normalverteilung basierende Zufallszahlen generiert. Für durch einen Formschluss bestimmte Dimensionen liegt der Erwartungswert der zugehörigen Verteilung in der Intervallmitte. Hingegen wird bei einer kraftschlüssigen Bestimmung der Lage davon ausgegangen, dass Werte an dem Intervallrand, in dessen Richtung die Spannkraft wirkt, am häufigsten auftreten. Die Abweichung in Achsen, die nicht vom Spannmechanismus determiniert werden, wird dahingegen durch Messwerte angenähert. Aus den auf diese Weise bestimmten Verteilungen werden gemäß Gleichung 2 auf Seite 53 die resultierenden Streubreiten der Eingangsgrößen des Kontaktierungsprozesses  $\Delta_{\rm E}$  berechnet.

Die lineare Verschiebung der Leiter in x-Richtung und somit der Fügespalt  $s_F$  wird von dem Kraftschluss bestimmt, der aus den Spannelementen resultiert, wohingegen sich die rotative Abweichung aus dem Formschluss unter Berücksichtigung des maximalen Übermaßes des Spannwerkzeugs ergibt. Die simulierten Messwerte und die Auswertung der Verteilung werden in den Histogrammen in Bild 79 dargestellt. Aus dem kraftschlüssigen Spannprinzip in Richtung der x-Achse ergibt sich in dieser Dimension die geringste Streubreite  $\Delta_E$  der linearen Abweichungen.



Bild 79: Simulierte Streuung der rotativen und lateralen Abweichung der x-Achse

Die Verschiebung der Leiter zueinander in y-Richtung wird durch den Formschluss unter Berücksichtigung des maximalen Übermaßes der Spannvorrichtung begrenzt. Aus diesem Grund zeigen die simulierten Messwerte die höchste relative Wahrscheinlichkeit  $h_n$  in der Mitte des Streubereichs, wie Bild 80 verdeutlicht. Die auf die y-Achse bezogene rotative Abweichung weist die höchste relative Wahrscheinlichkeit  $h_n$  bei ihrem Maximalwert auf. Dies resultiert aus der Wirkrichtung der Spannkraft. Dennoch ergibt sich die geringste Streubreite  $\Delta_E$  für diese Eingangsgröße.



Bild 80: Simulierte Streuung der rotativen und lateralen Abweichung der y-Achse

Bild 81 fasst die aus der z-Achse resultierenden Lageabweichungen zusammen. Während die Rotation in der Achse formschlüssig durch das maximale Übermaß des Spannmechanismus begrenzt wird, hat dieser keinen Einfluss auf die lineare Verschiebung. Da aus diesem Grund eine analytische Herleitung von Abweichungen nicht möglich ist, erfolgt die Erfassung von Messwerten an einem Demonstrator.



Bild 81: Gemessene laterale und simulierte rotative Abweichungen der z-Achse

Die Messdaten des linearen Versatzes in z-Richtung verdeutlichen, dass aus dem Fehlen der Lagebestimmung durch den Spannmechanismus und die komplexen vorausgehenden Umform- und Montageschritte die größte Streubreite  $\Delta_E$  für die Eingangsgröße der linearen Positionsabweichungen resultiert. Auch in Bezug auf die rotative Lageabweichung um die z-Achse führt das Übermaß der Spannvorrichtung zu einer hohen Streubreite der Eingangsgröße  $\Delta_E$ .

Um den Einfluss der Eingangsgrößen auf die Zielgröße des Kontaktierungsprozesses zu quantifizieren, erfolgt die Bestimmung des Regressionskoeffizienten nach Bartlett b<sub>B</sub> gemäß Gleichung 3 auf Seite 53. Die Grundlage dafür bilden die Messwerte aus Kapitel 5.2.4. Für jede der Abweichungen wird ein Koeffizient b<sub>B</sub> zur Beschreibung des Effektes auf den Widerstand R<sub>F</sub> berechnet. Da keine Abhängigkeit der Massendifferenz  $\Delta m$  von der Lage der Leiter zueinander nachgewiesen wird, wird dieser Zusammenhang nicht weitergehend berücksichtigt. Im Anschluss erfolgt die Bestimmung des prozesskettenbedingten Streuanteils  $\xi$  nach Gleichung 4 auf Seite 54. Tabelle 10 fasst die Streubreiten der Eingangsgrößen der laserbasierten Kontaktierung  $\Delta_E$ , die Regressionskoeffizienten b<sub>B</sub> für den Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> sowie die aus diesen Größen berechneten Streuanteile  $\xi$  zusammen.

	Achse	Streubreite $\Delta_E$	Widerstand Fügezone R <sub>F</sub>	
			Regressionskoeffizient b <sub>B</sub>	Streuanteil ξ
Versatz	x (s <sub>F</sub> )	0,059 mm	26,23 μΩ/mm	1,55 μΩ
	У	0,11 mm	2,36 μΩ/mm	0,25 μΩ
	z	0,74 mm	0,099 μΩ/mm	0,073 μΩ
Rotation	х	0,30°	-0,11 μΩ/°	0,034 μΩ
	у	0,17°	o,96 μΩ/°	0,16 μΩ
	z	0,40°	0,39 μΩ/°	0,16 μΩ

Tabelle 10: Abhängigkeit des Widerstands im Fügebereich RF von den Lageabweichungen

Neben Lageabweichungen der zu verbindenden Leiterenden zueinander führt eine Verschiebung des Leiterpaars in Richtung der z-Achse zu schwankenden Abständen der Leiteroberkanten zur Fokussieroptik. Somit schwankt die Fokuslage p<sub>F</sub>, woraus ein sich änderndes Intensitätsprofil resultiert. Die Baugruppe wird in der Schweißstation am Blechpaket aufgenommen. Unter Annahme der Positionierung des Blechpaketes in der z-Achse über dessen Oberkante auf der Schweißseite, ergibt sich die Variation der Position der Leiteroberkanten aus den Montage- und Biegetoleranzen der Formspulen. Der z-Versatz des Leiterpaars kann somit durch den Abstand der Leiteroberkanten zum Blechpaket z<sub>L</sub> quantifiziert werden. Um diesen abzuschätzen, werden die am Demonstrator ermittelten Messwerte in Bild 82 analysiert. Auf Grundlage der Messwerte des Kapitels 5.2.2 erfolgt des Weiteren die Berechnung der Regressionskoeffizienten nach Bartlett b<sub>B</sub> sowie des prozesskettenbedingten Streuanteils  $\xi$ der Massendifferenz  $\Delta m$  und des Widerstands der Fügezone R<sub>F</sub>. Da die Fokuslage p<sub>F</sub> ausgehend vom Wert Null im Zentrum der Versuche beidseitig variiert wird, werden zwei Regressionskoeffizienten b<sub>B</sub> berechnet und der Koeffizient mit dem größeren Betrag herangezogen.



Bild 82: Gemessene Verteilung des Abstands der Leiteroberkante zum Blechpaket  $z_L$  und Auswertung der Verteilung sowie Berechnung der Streuanteile  $\xi$ 

#### 7.1.2 Geometrische Variation der Formspulenenden durch vorausgehende Prozessschritte

Die geometrischen Eigenschaften der Formspulenenden resultieren primär aus dem Prozessschritt zur Herstellung der Einführfase sowie dem Trennen, wie aus Bild 20 hervorgeht. Da die Schnittkante der Leiter mit einer umlaufenden Fase versehen ist, wird die Bildung eines Grates, der den Abstand zwischen den Leitern beeinflusst, vernachlässigt. Zur Beurteilung der Variation der Einführfasengeometrie werden Versuchsteile, die aus einem Kupferlackdraht mit den Leiterabmessungen  $h_L$  von 2,36 mm und  $b_L$  von 4,5 mm hergestellt werden, geometrisch vermessen. Da in Kapitel 5.2.3 keine Beeinflussung des Prozessergebnisses durch die Breite der Einführfase  $b_F$  identifiziert wird, erfolgt die Auswertung nur für die Höhe  $h_F$  und Tiefe  $t_F$  der Fase. Die Messdaten fasst Bild 83 zusammen.



Bild 83: Messtechnisch erfasste Streuung der Fasengeometrie (Messdaten: [S13])

Die in den Histogrammen eingetragenen Quantile ermöglichen die Errechnung der Streubreiten der Eingangsgrößen  $\Delta_E$ , wobei die Tiefe der Fase  $t_F$  der geringsten Variation unterliegt. Auf Grundlage der Untersuchungen zur Einführfase des Kapitels 5.2.3 werden die Regressionskoeffizienten b<sub>B</sub> für den Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> berechnet. Für die Massendifferenz  $\Delta m$  wird keine signifikante Abhängigkeit von der Fasengeometrie identifiziert, weswegen diese Größe dabei nicht berücksichtigt wird. Für die Abhängigkeit des Fügezonenwiderstands R<sub>F</sub> von der Höhe der Einführfase h<sub>F</sub> ergibt sich ein prozesskettenbedingter Streuanteil  $\xi$  von 1,87 µ $\Omega$ , für die Tiefe der Fase t<sub>f</sub> von 0,74 µ $\Omega$ . Dies wird in Tabelle 11 zusammengefasst.

Taballa un Abhängigkoit dog	Widorstands im	Eijgeboreich P	von der Einführface
rabelle II. Abhangigken des	which stands in	rugebereien K <sub>F</sub>	von der Ennumase

	Campan 1	Widerstand Fügezone R <sub>F</sub>	
	Streubreite $\Delta_E$	Regressionskoeffizient b <sub>B</sub>	Streuanteil ξ
Höhe Fase $h_F$	0,21 mm	-8,90 μΩ/mm	1,87 μΩ
Tiefe Fase t <sub>F</sub>	0,12 mm	6,15 μΩ/mm	0,74 μΩ

## 7.1.3 Streuende Oberflächeneigenschaften der Fügezone in Folge der Formspulenherstellung

Aus dem erweiterten Prozessablauf in Bild 20 geht hervor, dass Isolationsrückstände, der Oxidationszustand sowie die Oberflächenrauheit der Leiteroberfläche im Kontaktierungsprozess Störgrößen darstellen. Da allerdings in der Auswertung in Bild 66 ermittelt wird, dass variierende Oxidationszustände keine signifikante Änderung des Prozessergebnisses zur Folge haben, wird diese Größe zur Beschreibung der Oberflächengestalt nicht weiter berücksichtigt.

Das Ergebnis des Kapitels 5.2.3 ist, dass die gemittelte Rauhtiefe Rz der Oberfläche, mit dem die Laserstrahlung in Wechselwirkung tritt, einen Einfluss auf das Prozessergebnis aufweist. Basierend auf dieser Erkenntnis soll die Einkopplung im Bereich der Bruchfläche erfolgen. Bild 84 stellt die Streuung der gemittelten Rauhtiefe Rz für diesen Teil der Schnittfläche dar. Im Rahmen der Erfassung der Messdaten wird berücksichtigt, dass der Schneidspalt s<sub>T</sub> des Scherschneidwerkzeugs in Abhängigkeit der Einstellung und des Verschleißzustands zwischen 0,1 mm und 0,2 mm variiert.



Bild 84: Analyse der gemittelten Rauhtiefe Rz des Bruchbereichs und Berechnung des Einflusses auf den Kontaktierungsprozess (Messdaten: [S13])

Auf Grundlage der Messdaten zur Beeinflussung der Massendifferenz  $\Delta m$ sowie des Widerstands der Fügezone R<sub>F</sub> durch die gemittelte Rauhtiefe Rz der Bruchfläche erfolgt die Berechnung der Regressionskoeffizienten b<sub>B</sub> und Streuanteile  $\xi$ . Dabei zeigt sich, dass mit einem Streuanteil  $\xi$  von 2,21 mg die Streuung der Oberflächenrauheit insbesondere Schwankungen bei der Entstehung von Auswürfen und Schweißspritzern hervorruft, wohingegen der Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften begrenzt ist. Rückstände aus einem unzureichenden Isolationsabtrag weisen eine Wechselwirkung mit der Entstehung von Auswürfen sowie der Qualität der Kontaktstelle auf, wie aus Bild 62 hervorgeht. Auf Grundlage der Versuchsreihe berechnen sich die Regressionskoeffizienten b<sub>B</sub> für die Massendifferenz  $\Delta m$  zu 0,25 mg/RFU sowie für den Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> zu 0,11  $\mu\Omega$ /RFU. Um die Streubreite  $\Delta_E$  der Eingangsgröße der Isolationsrückstände zu ermitteln, wird die Isolation von einem Kupferlackdraht der Leiterhöhe h<sub>L</sub> von 2,36 mm sowie Breite b<sub>L</sub> von 4,5 mm und einer mittleren Isolationsschichtstärke h<sub>I</sub> von 93  $\mu$ m abgetragen, um im Anschluss die Fluoreszenzintensität I<sub>F</sub> messtechnisch zu erfassen.

Als Abtragstechnologie findet ein infraroter gepulster Scheibenlaser mit einer Pulsdauer t<sub>p</sub> von 30 ns Anwendung. Da aus Vorversuchen bekannt ist, dass die Isolationsschichtstärke h<sub>I</sub> auch innerhalb einer Drahtspule Schwankungen unterliegt, werden die Musterteile von unterschiedlichen Bereichen des Drahtcoils entnommen. Die sich ergebende Verteilung ist in Form des Histogramms in Bild 85 dargestellt, wobei auch die zugehörige Streubreite  $\Delta_E$  eingetragen ist. Der prozesskettenbedingte Streuanteil  $\xi$  für die Entstehung von Auswürfen berechnet sich auf Grundlage der Daten zu 2,63 mg sowie für die elektrischen Eigenschaften der Kontaktstelle zu 1,16  $\mu\Omega$ .





## 7.2 Integration des Kontaktierungsprozesses in die Prozesskette

Die Entstehung von Auswürfen sowie die erzielbaren elektrischen Eigenschaften der Kontaktstelle unterliegen Streuungen. Dies verdeutlicht die Ermittlung der Prozessstreubreite  $\Delta_P$  für den Widerstand des Fügebereichs R<sub>F</sub> sowie die Massendifferenz  $\Delta m$  in Bild 86. Für die Auswertung werden die Messergebnisse aus der Validierung des Referenzprozesses in Kapitel 6.1 herangezogen. Die Daten beruhen auf einem Stichprobenumfang von 30 Musterteilen.



Bild 86: Analyse der Streuung des Referenzprozesses (Messdaten: [S5])

Die Analyse der im Referenzprozess hergestellten Versuchsteile zeigt, dass die elektrischen Eigenschaften des laserbasierten Kontaktierungsprozesses einer Prozessstreubreite  $\Delta_P$  von 1,12  $\mu$  $\Omega$  unterliegen. Im identischen Prozess beträgt die erzielte Streubreite  $\Delta_P$  der Massendifferenz  $\Delta m$  in Folge der Entstehung von Schweißspritzern und Auswürfen 3,12 mg. Bei der Interpretation der abgeleiteten Prozessstreubreiten  $\Delta_P$  des Referenzprozesses ist zu berücksichtigen, dass in diese die Gesamtheit der an den Probekörpern sowie der Positionierung unter Laborbedingungen auftretenden Abweichungen einfließen. Im Gegensatz dazu werden bei der Ermittlung der prozesskettenbedingten Streuanteile  $\xi$  die Störgrößen so gut wie möglich auf konstante Werte eingestellt, um den Einfluss der betrachteten Größe isoliert ermitteln zu können.

#### 7.2.1 Systematisierung prozesskettenübergreifender Wechselwirkungen

Die Abhängigkeit des Ergebnisses der laserbasierten Kontaktierung von vorausgehenden Prozessschritten wird in Form des prozesskettenbedingten Streuanteils  $\xi$  quantifiziert und vergleichbar gemacht. Aus Gleichung 4 auf Seite 54 geht hervor, dass sich dieser als das Produkt der Streubreite einer Eingangsgröße  $\Delta_E$  und dem Regressionskoeffizienten nach Bartlett b<sub>B</sub> berechnet. Hieraus wird abgeleitet, dass sich hohe prozesskettenbedingte Streuanteile  $\xi$  ergeben, wenn eine bzw. beide Größen hohe Beträge annehmen. Da insbesondere für den Widerstand der Fügezone R<sub>F</sub> eine große Anzahl relevanter prozesskettenübergreifender Wechselwirkungen identifiziert werden, erfolgt eine Strukturierung nach dem Regressionskoeffizienten b<sub>B</sub>, der den Effekt auf die Zielgröße ausdrückt, und der Streubreite der entsprechenden Eingangsgröße  $\Delta_E$ , die von vorausgehenden Prozessschritten bestimmt wird. Die dafür herangezogenen Werte basieren auf den Untersuchungen des Kapitels 7.1. Das Ergebnis ist in der Eingangsstreuung-Effekt-Matrix in Bild 87 dargestellt.



Bild 87: Strukturierung prozesskettenübergreifender Wechselwirkungen in einer Eingangsstreuung-Effekt-Matrix

Die Eingangsstreuung-Effekt-Matrix lässt sich in die vier in Bild 87 eingetragenen Felder unterteilen. Unkritische prozesskettenübergreifende Wechselwirkungen befinden sich im III. Feld, da diese eine geringe Streuung der Eingangsgröße sowie einen kleinen Effekt auf die Zielgröße aufweisen. Hingegen besitzen die im I. Feld eingeordneten Wirkbeziehungen die größte Kritikalität, da die betreffende Eingangsgröße einer hohen Streuung unterliegt und diese zugleich einen starken Effekt auf die Zielgröße aufweist. Sowohl in Bezug auf die Entstehung von Auswürfen als auch die elektrischen Eigenschaften ist der z-Versatz des Leiterpaars im Stator in diesem Bereich verortet. Zur Reaktion auf die betreffende Wirkbeziehung empfiehlt sich neben der Reduktion der Streuung der Eingangsgröße auch eine Erfassung der Ausprägung der Eingangsgröße vor dem Kontaktierungsprozess, sodass die Prozessparameter zum Ausgleich angepasst werden können.

Durch ihre Lage im II. Feld werden Wirkbeziehungen identifiziert, deren Eingangsgröße einer großen Streubreite unterliegt, wobei die Wirkung auf die Zielgröße gering ausfällt. Für dieses Feld empfiehlt es sich, die Streuung der Eingangsgröße durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren. In der Analyse werden die Oberflächenrauheit und Isolationsrückstände für beide Zielgrößen in diesem Bereich eingeordnet.

Die Wirkbeziehungen, die im IV. Feld eingruppiert sind, haben einen starken Effekt auf die Zielgröße, wobei die Eingangsgröße nur einer geringen Streuung unterliegt. Dies ist bezogen auf die elektrischen Eigenschaften für die Höhe und Tiefe der Fase, den Fügespalt sowie den Versatz der Leiter zueinander entlang der y-Achse der Fall. Eine geeignete Maßnahme zur Reaktion auf diese Wirkbeziehungen liegt darin, die Ausprägung der Eingangsgröße zu erfassen und im Prozess darauf zu reagieren.

Um gezielte Maßnahmen zur Stabilisierung des Kontaktierungsprozesses abzuleiten, ist die Identifikation der wesentlichen Störgrößen, die zur Streuung des Kontaktierungsprozesses beitragen, notwendig. Zu diesem Zweck erfolgt eine Klassifizierung der Wechselwirkungen auf Grundlage des prozesskettenbedingten Streuanteils ξ, wofür das Pareto-Prinzip herangezogen wird. Dieses liegt der Beobachtung zugrunde, dass ein geringer Anteil der Ursachen ein hohes Maß der Wirkung hervorrufen [203]. In den in Bild 88 dargestellten Pareto-Diagrammen werden die von vorausgehenden Prozessschritten beeinflussten Störgrößen des Kontaktierungsprozesses nach ihrem Streuanteil  $\xi$  sortiert abgebildet und mit der Grenze des kumulierten Anteils von 80 % verglichen. Aus der Kurve des kumulierten relativen prozesskettenbedingten Streuanteils  $\xi$  wird sichtbar, dass vier Wirkbeziehungen für 80 % der aus den prozesskettenübergreifenden Wechselwirkungen resultierenden Streuung der elektrischen Kontaktstelleneigenschaften verantwortlich sind. Dabei handelt es sich um den z-Versatz der Leiter im Stator, die Höhe der Fase, den Fügespalt sowie die Isolationsrückstände. Der Vergleich der zugrundeliegenden Streuanteile mit dem Referenzprozess zeigt, dass alle identifizierten Wirkbeziehungen größere Streuungen der elektrischen Eigenschaften der Kontaktstelle verursachen, als beim ideal eingestellten Prozess zu erwarten sind.



Bild 88: Pareto-Analyse der Beeinflussung des Kontaktierungsprozesses durch vorgelagerte Prozessschritte

Die Pareto-Analyse für Schweißspritzer und die Entstehung von Auswürfen zeigt, dass der z-Versatz der Leiter im Stator sowie die Abtragsqualität der Lackisolation für ca. 80 % der von vorausgehenden Prozessschritten beeinflussten Prozessstreuung verantwortlich sind. Bereits im Referenzprozess zeigt die Massendifferenz  $\Delta m$  eine Prozessstreubreite von ca. 3 mg. Diese fällt somit höher aus als der Streuanteil der zweiten wesentlichen Einflussgröße auf die Massendifferenz  $\Delta m$ , die Isolationsrückstände.

Auf Basis der Analysen wird abgeleitet, dass die Kontaktierung vom Ergebnis des Prozessschritts der Montage der Leiter, des Spannprozesses, des Trennprozesses sowie des Isolationsabtrags beeinflusst wird. Folglich kann die Prozessstreuung des Kontaktierungsprozesses maßgeblich reduziert werden, indem in diesen Prozessen gleichbleibende Ergebnisse angestrebt werden oder bei der Kontaktierung eine aktive Reaktion auf deren Schwankung erfolgt.

#### 7.2.2 Konzeption eines Systems zur prozesssicheren Kontaktierung von Formspulenwicklungen

Um den Einfluss der Streuung vorgelagerter Herstellungsschritte auf das Ergebnis der Kontaktierung zu reduzieren, wird im Kontext der Prozesskette ein adaptives System konzipiert [P12]. Dieses reagiert automatisiert auf Störgrößen und berücksichtigt die wesentlichen, in der Pareto-Analyse in Kapitel 7.2.1 identifizierten, prozesskettenübergreifenden Abhängigkeiten des Kontaktierungsprozesses. Außerdem orientieren sich die abgeleiteten Maßnahmen an der Einordnung in die Felder der Eingangsstreuung-Effekt-Matrix in Bild 87. Für das System werden eine statische sowie eine selbstlernende Variante abgeleitet. Zur Realisierung der statischen Ausprägung ist in die Prozesskette aus Bild 20 ein zusätzlicher Schritt zu integrieren. Dabei handelt es sich um das Spannen der Leiterenden vor dem Kontaktierungsprozess. Zur Implementierung des selbstlernenden Systems werden zusätzlich zwei Stationen zur Erfassung von Qualitätsmerkmalen des Abtrags- und Kontaktierungsprozesses in das System eingefügt. Dies verdeutlicht Bild 89, wobei die zusätzlichen Komponenten des selbstlernenden Systems in grün dargestellt sind. Insofern die Taktzeit es ermögkönnen die zusätzlichen Vorgänge in die Stationen licht. zum Isolationsabtrag bzw. zur Kontaktierung integriert werden.



Bild 89: Konzipiertes System zur prozesssicheren Kontaktierung von Formspulenwicklungen Die konzipierte statische Ausprägung des adaptiven Systems ermöglicht es, auf Lackrückstände, die aus einer schwankenden Isolationsschichtstärke h<sub>I</sub> oder Veränderungen beim Isolationsmaterial resultieren, zu reagieren. Dafür wird die Intensität des Prozessleuchtens, wie in Kapitel 4.2.2 vorgestellt, während des Abtrags ausgewertet und die Parameter korrigiert, sodass z.B. eine zusätzliche Abtragsiteration am Werkstück stattfindet. Hierdurch wird die Streuung der Eingangsgröße der Isolationsrückstände gesenkt, wodurch sich der Schweißprozess stabilisiert.

Im Rahmen des Fügeprozesses erfolgt des Weiteren eine automatisierte Anpassung der Vorschubbahn im Raum an die Fuge sowie der Lage der Strahltaille an die Werkstückoberfläche. Ein Vision-System erfasst die Position der Leiter nach dem Spannen, auf deren Basis die Start- und Endkoordinaten des Schweißvorschubs bestimmt und an das Lasersystem übertragen werden. Zur Anpassung des Abstands der Fokussieroptik von der Werkstückoberfläche ist diese an einer z-Achse angebracht. Der an der Bearbeitungsoptik befestigte Abstandssensor erfasst die Distanz zur Werkstückoberfläche, woraufhin das Achssystem die Fokuslage anpasst. Die Laserparameter werden auf Grundlage der Höhe der Einführfase sowie des Fügespalts angepasst, indem z.B. die Laserleistung und Amplitude der örtlichen Leistungsmodulation adaptiert werden. Auch diese Informationen werden vom Vision-System nach dem Spannprozess erfasst. Auf Basis der Ausprägungen der Störgrößen werden korrigierte Parameter für den Laserstrahlschweißprozess bestimmt und an das Lasersystem übertragen, wodurch die resultierenden Prozessstreuungen reduziert werden.

In der statischen Ausprägung des Systems erfolgt die Reaktion basierend auf vorgegebenen, unveränderlichen Zuordnungen zwischen den Stör- und Steuergrößen. Dies ist insbesondere bei der Adaption der Parameter zum Laserstrahlschweißen nachteilig, da nur eine isolierte Reaktion auf die Ausprägung der einzelnen Störgrößen, nicht auf deren Kombination, erfolgen kann. Um der Komplexität und Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten Rechnung zu tragen, ist es eine Möglichkeit, das statische adaptive System um Funktionen des Selbstlernens zu erweitert. Dafür werden im Anschluss an den Kontaktierungsprozess Qualitätsinformationen ermittelt und innerhalb der Parameterberechnung in einer Datenbank den Ausprägungen der Störgrößen und eingesetzten Prozessparametern zugeordnet. Zur Ermittlung und Klassifizierung der Qualität findet eine kombinierte Kontaktstelleninspektion Anwendung. Dieses von Mayr et al. konzipierte System vereint eine optische Erfassung der Kontaktstellengeometrie mit der Messung des elektrischen Widerstands in einer Vierleitermessung. Aus der Werkstückgestalt werden Fehler, wie z.B. unregelmäßige Nahtoberflächen,

versetzte Schweißnähte oder Poren erkannt. Dies ermöglicht neben der ausschließlichen Optimierung der elektrischen Eigenschaften auch eine Berücksichtigung dieser Fehlerarten. [P17]

Auf Grundlage der Auswertung bereits durchgeführter Kontaktierungsoperationen erfolgt durch das selbstlernende System zur Optimierung des Prozessergebnisses eine selbständige Anpassung und Erweiterung der statisch vorgegebenen Parameterfelder. Analog wird das Prozessergebnis des Isolationsabtrags in Abhängigkeit der eingesetzten Parameter und der detektierten Intensität des Prozessleuchtens ausgewertet, um durch angepasste Prozessparameter die Notwendigkeit nach zusätzlichen Iterationen des Abtragsprozesses zu reduzieren. Zur Realisierung der notwendigen Algorithmen sei z.B. auf die Dissertationsschrift von Günther verwiesen. In dieser wird für das Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche eine Kombination aus Deep Learning sowie allgemeinen Wertefunktionen eingesetzt, um Steuersignale zu erzeugen. Dabei ist die Architektur auch geeignet, sich ohne manuelle Eingriffe weiterzuentwickeln. [251]

Das in Bild 89 dargestellte System stellt einen auf den Versuchsergebnissen dieser Ausarbeitung basierenden konzeptionellen Ansatz dar. Für dessen Implementierung sind weitergehende Untersuchungen notwendig. So ist die für das System vorgesehene Sensorik grundlegend verfügbar, aber ihre Eignung für den vorgesehenen Einsatz bedarf einer eingehenden Analyse. Dabei ist neben der Dauer der Messungen die Qualität der Messdaten zu analysieren und optimieren. Darüber hinaus sind Ursachen für Messfehler zu identifizieren und Strategien für deren Vermeidung zu entwickeln. Auch die Anpassung von Prozessparametern auf Grundlage vorgegebener Wertetabellen stellt eine verfügbare Technologie dar. Allerdings kann mit dieser nicht die Komplexität der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen des Laserstrahlschweißens von Formspulenwicklungen abgebildet werden. Um dieser Restriktion zu begegnen, sind die zur Lösung vorgeschlagenen Algorithmen des selbstlernenden Systems zu entwickeln und analysieren. Dies gilt neben der Klassifizierung der Kontaktstellenqualität insbesondere auch für die auf dem Selbstlernen basierende Anpassung der Prozessparameter.

## 7.3 Zusammenfassung und Fazit prozesskettenübergreifender Abhängigkeiten

Zur Herstellung flachleiterbasierter offener Formspulenwicklungen ist eine Vielzahl an Prozessschritten notwendig. Dabei beeinflussen Merkmale der Werkstücke, die von vorausgehenden Schritten determiniert werden, den Prozess der Kontaktierung maßgeblich. Dies äußert sich dadurch, dass sich die Variation dieser Eingangsgrößen des Kontaktierungsprozesses in der Streuung der Qualität des Prozessergebnisses widerspiegelt. Da bei der Herstellung von Statoren mit Formspulenwicklung gleichbleibende Kontaktstelleneigenschaften zu realisieren sind, müssen diese Streuungen minimiert werden. Zu diesem Zweck wird die dritte Forschungsfrage, welche Wechselwirkungen entlang der Prozesskette den Kontaktierungsprozess beeinflussen und wie deren Kenntnis zur Reduktion der Prozessstreuung eingesetzt werden kann, beantwortet.

Um die prozesskettenübergreifenden Wechselbeziehungen strukturiert darzustellen und deren Wichtigkeit zu bewerten, wird der Streuanteil der relevanten Abhängigkeiten berechnet. Dieser basiert auf der Streubreite der jeweiligen Eingangsgröße sowie deren Effekt auf das Ergebnis des Kontaktierungsprozesses. Mit diesem Ziel werden auf Basis der in Kapitel 5 untersuchten Wirkbeziehungen durch eine Regression nach Bartlett die Effekte der Eingangsgrößen auf Schweißspritzer sowie die Entstehung von Auswürfen und die elektrischen Kontaktstelleneigenschaften bestimmt. Zusätzlich erfolgt die Ermittlung der Streubreite von Eingabegrößen, die einen signifikanten Effekt auf die Zielgrößen aufweisen und von vorausgehenden Prozessschritten abhängen. Durch die Aufstellung von Eingangsstreuung-Effekt-Matrizen erfolgt eine Strukturierung der identifizierten Wirkbeziehungen und geeignete Maßnahmen zur Reduktion der resultierenden Prozessstreuung können abgleitet werden.

In einer Pareto-Analyse werden die wesentlichen prozesskettenübergreifenden Wirkbeziehungen identifiziert. Dabei handelt es sich um den aus der Montage der Formspulen resultierenden z-Versatz der Leiterenden im Stator. Außerdem wirkt sich eine Veränderung des Fügespalts, die sich aus einer Verschiebung der Leiter zueinander in x-Richtung trotz des Spannprozesses ergibt, auf das Prozessergebnis aus. Auch der Trennprozess, der sich durch die Höhe der Einführfase, sowie der Abtragsprozess, der sich durch Lackrückstände auf den Kontaktierungsprozess auswirkt, werden als wesentliche zu berücksichtigende Wirkbeziehungen identifiziert. Ein Vergleich der von diesen Größen hervorgerufenen Streuung des Prozessergebnisses ergibt insbesondere im Hinblick auf die elektrischen Eigenschaften der Kontaktstellen, dass diese deutlich größer sind als die Streuung des Referenzprozesses.

Mit dem Ziel im Kontext der Herstellungskette eine prozesssichere Kontaktierung im Laserstrahlschweißverfahren umzusetzen, wird ein adaptives System mit zwei Ausbaustufen konzipiert, das die zuvor identifizierten Wirkbeziehungen berücksichtigt. In der statischen Variante erfassen Sensoren Störgrößen, auf deren Basis das System durch vordefinierte Abhängigkeiten der Steuergrößen reagiert. Dabei handelt es sich im Kontext des Abtrags der Isolation um eine messtechnische Erfassung des Prozessleuchtens, auf dessen Basis z.B. mittels zusätzlicher Iterationen des Lackabtrags eine hohe Abtragsqualität sichergestellt wird, die eine Voraussetzung für stabilen Kontaktierungsprozess darstellt. einen Im Kontext der Schweißoperation erfasst ein Vision-System die Lage der Leiter im Raum, um die Vorschubbahn anzupassen. Zusätzlich wird der Abstand zwischen Leiteroberfläche und Fokussieroptik gemessen, um mittels einer Achse die Lage der Werkstückoberfläche in der Fokusebene sicherzustellen. Zusätzlich erfasst das Vision-System die Höhe der Fase sowie den Fügespalt, wodurch mit entsprechend adaptierten Laserparametern Abweichungen ausgeglichen werden. Da die Komplexität des Laserstrahlschweißens von Formspulenwicklungen mit seiner Vielzahl an Prozessparametern und Störgrößen nicht umfänglich in dem konzipierten statischen adaptiven System abgebildet werden kann, wird dieses in der zweiten Variante um Funktionen des Selbstlernens erweitert. Dazu erfolgt die Erfassung von Qualitätsinformationen des Abtrags- und Kontaktierungsprozesses in zusätzlichen Stationen. Durch die Zuordnung des Prozessergebnisses zu den eingesetzten Prozessparametern und Ausprägungen der Störgrößen wird das adaptive System in die Lage versetzt, auf Basis bereits durchgeführter Kontaktierungsoperationen geeignete Prozessparameter abzuleiten.

Das konzipierte adaptive System ermöglicht die Reduktion der Streuung des Prozessergebnisses auf Basis der Kenntnis der wesentlichen prozesskettenübergreifenden Wirkbeziehungen. Durch deren Identifikation sowie die getroffenen Schlussfolgerungen wird somit die dritte Forschungsfrage beantwortet.

# 8 Zusammenfassung und Ausblick

Unter dem Einfluss der Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs durchlaufen PKW und insbesondere die eingesetzten elektrischen Maschinen eine rasante Transformation. Dabei wird die Evolution elektrischer Antriebe durch automobilspezifische Anforderungen motiviert. Neben hohen Leistungsdichten und Wirkungsgraden, ist insbesondere auch die Notwendigkeit, eine effiziente Großserienproduktion zu realisieren, anzuführen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird der Einsatz von Formspulenwicklungen aus lackisolierten Leitern rechteckigem Querschnitts als aussichtsreiche Technologie angesehen.

Die in der Regel aus lackisolierten Kupferleitern aufgebaute Wicklung stellt den Kernbestandteil elektrischer Maschinen dar und erzeugt die zur Energiewandlung benötigten magnetischen Felder. Durch ihren Aufbau aus Formspulen mit rechteckigem Leiterquerschnitt wird neben der Erschließung zahlreicher produktbezogener Vorteile insbesondere die Herstellung von Wicklungen revolutioniert. So ermöglicht diese Technologie die Substitution der gegenwärtig eingesetzten und limitierten Wickelverfahren durch besser beherrschbare Biegeumform-, Montage- und Fügeprozesse. Dabei stellt der Prozessschritt der Kontaktierung, der zur Herstellung einer mechanischen und elektrischen Verbindung zwischen den Formspulenenden eingesetzt wird, die größte Herausforderung dar. Neben der hohen Anzahl der durchzuführenden Fügeoperationen äußert sich dies insbesondere durch herausfordernde mechanische und elektrische Anforderungen, die schlechte Erreichbarkeit der Kontaktstellen sowie das Materialverhalten des eingesetzten lackisolierten Kupferdrahtes.

Die Einsetzbarkeit von Fügetechnologien zur Kontaktierung wird neben der Wicklungsauslegung von technischen und wirtschaftlichen Anforderungen bestimmt. Auf Grundlage einer in dieser Dissertation konzipierten Systematik zur Bewertung von Kontaktierungsverfahren zeigt sich, dass etablierte Technologien nur bedingt zur Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen einsetzbar sind. Hingegen weisen die berührungslosen Laserstrahlschweißverfahren durch kurze Taktzeiten und hohe Reproduzierbarkeiten Potenziale zur Realisierung dieses Prozessschritts auf. Zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Dissertationsschrift erreichen lediglich leistungsfähige Laser im infraroten Wellenlängenbereich die zur Kontaktierung von Formspulenwicklungen benötigten Einschweißtiefen. Dabei stellt das Materialverhalten des zu fügenden Kupferwerkstoffes, das durch ein niedriges und stark schwankendes Absorptionsverhalten für Laserstrahlung, eine hohe Wärmeleitfähigkeit sowie die Entstehung von Schweißspritzern und Poren gekennzeichnet ist, eine maßgebliche Herausforderung dar. Erschwerend kommt hinzu, dass die Isolation auf der Leiteroberfläche im Fügebereich reproduzierbar zu entfernen ist und isolierte Leiterbereiche im Fügeprozess nicht beschädigt werden dürfen.

Um die Herstellung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen in Großserie zu ermöglichen, ist es das Ziel dieser Dissertation, deren Kontaktierung unter Einsatz des Laserstrahlschweißens mit infraroten Lasern im Kontext der Prozesskette grundlegend zu erforschen. Zunächst werden relevante Prozessgrößen in einer Ursache-Wirkungs-Analyse identifiziert und priorisiert. Im Ergebnis sind 16 Einflussgrößen in Experimenten zu adressieren. Da eine Vielzahl dieser Faktoren von vorgelagerten Prozessschritten bestimmt werden, erfolgt im Anschluss die Analyse einer exemplarischen Fertigungskette für die Herstellung flachleiterbasierter offener Formspulenwicklungen. Auf Grundlage der theoretischen Überlegungen wirken sich insbesondere der Abtrag des Isolationslacks, das Trennen der Leiter sowie die Formgebung und Montage auf den Kontaktierungsprozess aus. Zur Beschreibung dieser prozesskettenübergreifenden Wechselbeziehungen wird die Kennzahl des Streuanteils entwickelt. Diese berechnet sich aus der Streuung des von einem vorausgehenden Prozess bestimmten Merkmals und dem Effekt dieses Merkmals auf das Ergebnis des Kontaktierungsprozesses.

Da die Voraussetzung zur erfolgreichen Herstellung einer Kontaktstelle die definierte Entfernung der Isolationsschicht darstellt, werden laserbasierte Abtragsverfahren analysiert. Neben geringen Isolationsrückständen stellen die Realisierung eines definierten Übergangsbereichs sowie die Vermeidung des Abtrags von Leitermaterial zentrale Anforderungen dar. Um das Abtragsergebnis messtechnisch erfassen zu können, wird eine Fluoreszenzmessung konzipiert und validiert, wobei das Messprinzip als geeignet bewertet wird. In Abhängigkeit der Wellenlänge der Laserstrahlung stellt sich heraus, dass unterschiedliche Abtragsmechanismen, ein Verbrennen bei mittlerer Infrarotstrahlung und eine Delamination bei naher Infrarotstrahlung, zu beobachten sind. Die Beurteilung der erzielbaren Abtragsqualitäten belegt, dass sich Lasertechnologien zum reproduzierbaren Abtrag der Lackisolation von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen eignen.

Zur Analyse des Laserstrahlschweißens flachleiterbasierter Formspulenwicklungen erfolgt der Einsatz leistungsfähiger infraroter Laser mit einer hohen Fokussierbarkeit. Um Kontaktstellen mit guten elektrischen Eigenschaften herzustellen, ist eine hohe Einschweißtiefe bei einer reduzierten Anzahl an Poren anzustreben. Darüber hinaus sind Isolationsschäden, die neben Auswürfen und einem direkten Einfall von Laserstrahlung aus einem zu großen Wärmeeintrag resultieren können, zu vermeiden. Zur Evaluierung der aus dem Prozess hervorgehenden Temperaturverteilung in der Wicklung wird ein numerisches Prozessmodell aufgebaut und erfolgreich validiert. Eine Simulationsstudie zeigt die bei unterschiedlichen Parametern im Werkstück auftretende räumliche Verteilung der Maximaltemperaturen.

In experimentellen Untersuchungen werden die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den Prozessparametern, der Werkstückbeschaffenheit sowie den erzielbaren Kontaktstelleneigenschaften ermittelt. Dabei zeigt sich, dass der Einsatz hoher Laserleistungen in Kombination mit schnellen Vorschubbewegungen Vorteile mit sich bringt. Zur Reduktion des Nahteinfalls erfolgt eine Erweiterung der Vorschubbewegung um weitere Linien, während die Vermeidung von Isolationsschäden durch eine Verkürzung der Vorschubgeometrie auf ca. 75 % der Leiterbreite erreicht wird. In den Untersuchungen gelingt es nicht, Poren durch Leistungsrampen maßgeblich zu reduzieren, dafür kann auf diese Weise die Bildung von Schweißspritzern und Auswürfen verringert werden. Für den Einsatz von Scanner-Optiken ist zu berücksichtigen, dass sich im Randbereich des Bearbeitungsfelds die Kontaktstelleneigenschaften verschlechtern. Mittels programmierbarer Fokussieroptiken werden alternative Vorschubbewegungen untersucht, wodurch die Kontaktstellengeometrie beeinflusst wird. Dabei zeigt sich insbesondere der Einsatz einer zirkularen örtlichen Leistungsmodulation als vorteilhaft im Hinblick auf die Prozessstabilität und Entstehung von Schweißspritzern und Auswürfen, wobei der Kontaktwiderstand geringfügig steigt. Die Variation der Lage der Fokusebene bezogen auf die Werkstückoberfläche belegt, dass eine Verschiebung in das Werkstück die Entstehung von Schweißspritzern reduziert, ohne die Kontaktstelleneigenschaften zu verschlechtern. Mit dem Einsatz von Lasersystemen kleineren Strahltaillendurchmessers lassen sich im Mittel geringere Widerstände erzielen, wobei sich Prozessstabilität die verschlechtert. Um die Versuchsergebnisse auf variierende Leitergeometrien übertragen zu können, wird belegt, dass sich bei gleichbleibenden Werten der auf die Leiterhöhe bezogenen Streckenenergie ähnliche elektrische Eigenschaften erzielen lassen. Die Untersuchungen belegen die Wichtigkeit eines rückstandsfreien Lackabtrags, da sich die elektrischen Kontaktstelleneigenschaften sowie die Entstehung von Schweißspritzern und Auswürfen bereits bei Fluoreszenzintensitäten im Bereich von 10 RFU merklich verschlechtern sowie eine starke Porenbildung hervorrufen.

Darüber hinaus zeigt sich, dass zunehmende Oberflächenrauheiten die Energieeinkopplung negativ beeinflussen. Hingegen kann für den Oxidationszustand der Leiteroberfläche kein Einfluss auf den Fügeprozess identifiziert werden. Einführfasen im Fügebereich wirken sich auf die erzielbaren Kontaktstelleneigenschaften aus, indem sie den Fluss des geschmolzenen Materials beeinflussen und ein Fehlen an aufschmelzbaren Materialvolumens darstellen. In den Untersuchungen werden alle rotativen und lateralen Positionierungsabweichungen der Leiter zueinander untersucht. Dabei wirkt sich insbesondere ein großer Fügespalt nachteilig aus, wobei der Einsatz einer zirkularen örtlichen Leistungsmodulation weniger empfindlich auf große Verschiebungen ist. Für den abschließend betrachteten Einsatz von Prozessgasen kann ein positiver Einfluss auf die Entstehung von Auswürfen identifiziert werden.

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen wird ein Referenzprozess für das Laserstrahlschweißen flachleiterbasierter Formspulenwicklungen abgeleitet, der insbesondere im Hinblick auf die elektrischen Kontaktstelleneigenschaften eine hohe Maschinenfähigkeit aufweist. In einer Temperaturschockprüfung zeigt sich, dass die Probeneigenschaften nicht negativ beeinflusst werden, während diese sich bei Vibrationsbelastungen verschlechtern, ohne die obere Spezifikationsgrenze zu verletzen. Dies kann in erster Linie auf Proben mit Poren zurückgeführt werden, in deren Bereich Risse entstehen. Der Benchmark des Referenzprozesses mit dem Widerstandspressschweißen, Ultraschallschweißen sowie Widerstandshartlöten zeigt, dass das Laserstrahlschweißen die kürzeste Prozesszeit und höchste Prozessstabilität kombiniert. Dabei ist es das einzige Verfahren, bei dem weder thermische Isolationsschäden noch eine starke Verformung der Leiter auftreten. Der wirtschaftliche Vergleich der technologischen Alternativen zeigt, dass das Laserstrahlschweißen insbesondere bei hohen Produktionsmengen die mit Abstand geringsten Kontaktierungskosten je Stator aufweist.

Mit dem Ziel die untersuchten Technologien der Anwendung im Serieneinsatz näherzubringen, erfolgt die Analyse prozesskettenübergreifender Abhängigkeiten, um ein Konzept zur Implementierung der Kontaktierung in der Herstellungskette abzuleiten. Dafür wird zunächst die Wirkung der abhängigen Eingangsgrößen des Kontaktierungsprozesses durch den Regressionskoeffizienten quantifiziert. Für die Bestimmung des Streuanteils ist zusätzlich die Streubreite der Eingangsgrößen, die von vorausgehenden Prozessschritten determiniert werden, zu berücksichtigen. Dies erfolgt entweder durch die Simulation entsprechender Verteilungen auf Grundlage analytischer Betrachtungen oder in Messreihen. Im Anschluss werden die berücksichtigten Wechselbeziehungen in einer Eingangsstreuung-Effekt-Matrix strukturiert und die wesentlichen prozesskettenübergreifenden Wechselwirkungen in einer Pareto-Analyse identifiziert. Dabei zeigt sich, dass der aus der Montage resultierende z-Versatz des Leiterpaars im Blechpaket, der vom Spannprozess bestimmte Fügespalt, die im Trennprozess hergestellte Höhe der Einführfase sowie aus dem Abtragsprozess resultierende Isolationsrückstände die wesentlichen Ursachen prozesskettenübergreifender Streuungen des Kontaktierungsprozesses darstellen. Ein Vergleich der von diesen Größen hervorgerufenen Abweichungen mit der Streuung des Referenzprozesses belegt, dass diese insbesondere die elektrischen Eigenschaften maßgeblich beeinflussen. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird ein adaptives Kontaktierungssystem konzipiert, welches automatisiert den Einfluss der Streuung der Eingangsgrößen auf das Prozessergebnis minimiert. In einer statischen Variante erfolgt die Reaktion dabei auf Basis vorgegebener Beziehungen zwischen Störgrößen und Prozessparametern. Durch die Erweiterung um eine Erfassung qualitätsrelevanter Daten der Prozessergebnisse sowie Elemente des Maschinellen Lernens, wird das adaptive System darüber hinaus in die Möglichkeit versetzt, selbständig Optimierungen durchzuführen, um die Prozessstreuung zu reduzieren.

Die vorliegende Dissertationsschrift schafft durch die umfassende Analyse des Laserstrahlschweißprozesses flachleiterbasierter Formspulenwicklungen, kombiniert mit laserbasierten Abtragsprozessen, die Grundlage zur Herstellung von Statoren mit dieser neuen Wicklungstechnologie. Da in den Untersuchungen die komplexe Herstellungskette berücksichtigt wird, gelingt es darüber hinaus Möglichkeiten aufzuzeigen, die Kontaktierung in diese zu integrieren und dabei die Prozessstabilität zu steigern. Hierdurch wird eine Überführung der Forschungsergebnisse in die Serienproduktion ermöglicht.

In weiteren Forschungstätigkeiten empfiehlt es sich, Potenziale neuer Lasertechnologien für die Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen zu analysieren. Hier ist insbesondere der Einsatz kürzerer Wellenlängen zum Schweißen, z.B. im blauen oder grünen Spektrum, anzuführen, wenn Systeme mit ausreichender Leistung und Strahlqualität verfügbar sind. Auch gilt es zu eruieren, ob mit dem Einsatz speziell konfigurierter Intensitätsverteilungen im Brennfleck Vorteile im Fügeprozess erschlossen werden können. Zur Entfernung der Lackisolation empfiehlt sich die Untersuchung, ob eine Verkürzung der Pulsdauern mit optimierten Abtragsergebnissen einhergeht. In zukünftigen Arbeiten ist des Weiteren auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse der vorliegenden Dissertation eine serientaugliche Produktionsanlage zu konzipieren und detaillieren. In diesem Kontext sind insbesondere Ansätze des Maschinellen Lernens auf die Prozesskette zur Herstellung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen anzuwenden und damit weitere Optimierungsmöglichkeiten des Kontaktierungsprozesses zu erschließen. Neben der Entwicklung geeigneter Algorithmen müssen hierbei insbesondere Sensoren identifiziert werden, mit deren Hilfe die relevanten Prozessgrößen sicher erfasst werden können.

# 9 Summary and outlook

Affected by the electrification of the automotive power train, passenger cars and especially the applied electrical machines are undergoing a rapid transformation. This evolution of electrical drives is motivated by automotive requirements. In addition to rising power densities and efficiencies, an effective large-volume production needs to be realized. To solve these challenges, the application of bar-wound windings produced from flat conductors is a promising technology.

The winding represents an essential component of electrical machines, since it generates the magnetic fields necessary for the conversion of energy. It mostly consists of enameled copper wires. By manufacturing it as a bar-wound winding with rectangular cross-section, product-related advantages can be realized and especially the production of windings is revolutionized. Thus this technology is a possibility to replace the limited winding technologies currently used with bending, assembling and joining processes that can be controlled better. In this context, the contacting operation realizing a mechanical and electrical connection between preformed coils poses a major challenge. As a reason the high number of joining operations necessary, the poor accessibility, demanding mechanical and electrical requirements as well as the material behavior of the enameled copper wires have to be mentioned.

The application of joining technologies to realize contacting operations is determined by the design of the winding and technical as well as commercial requirements. A classification of contacting technologies conceived in this thesis indicates, that established processes show drawbacks concerning the contacting of bar-wound windings with rectangular cross-sections. As opposed to this, the non-contacting laser welding technology shows potentials to realize this process step, as it features a short cycle time and high reproducibility. At the time this dissertation is developed, only powerful infrared lasers attain the weld penetration depths required for the contacting of bar-wound windings. In this context, the material behavior of copper is challenging due to its poor absorption behavior, high thermal conductivity and the formation of pores and spatter. This is aggravated by the insulating varnish on the conductor's surface that needs to be removed reproducibly in the joining area and must not be damaged by the contacting operation beyond that.

To facilitate the manufacturing of bar-wound windings with rectangular cross-section in large-volume production, the objective of this thesis is to do fundamental research on their contacting by means of the infrared laser welding technology in context of the production chain. Initially, relevant process variables are identified in a cause and effect analysis and prioritized. As a result, sixteen magnitudes need to be addressed in experiments. Since a variety of them is affected by precedent production steps, an exemplary production chain for opened bar wound windings with rectangular cross-section is analyzed. It is deduced, that especially the removal of the enamel, the cutting of the conductors as well as the shaping and assembly influences the contacting operation. To quantify these interrelationships, the amount of dispersion is developed. This magnitude is calculated based on the variance of the relevant property influenced by a previous process step and the impact of this on the contacting process.

Since a defined removal of the insulating enamel is one precondition for a successful manufacturing of a contact, laser-based removal processes are investigated. In addition to accomplishing minor residues, it is necessary to achieve a defined transition area and avoid the removal of conducting material. For the metrological determination of the skinning result, a fluorescence measurement is designed and validated successfully. Depending on the wavelength of the laser's radiation, different removal mechanisms are identified. While mid-wavelength infrared radiation burns the insulating material as the result of a direct interaction, near-infrared radiation removes the enamel due to a delamination. The analysis of the skinning quality achievable proves, that laser-based technologies are suitable to remove the insulating enamel from bar-wound windings with rectangular cross-sections.

Powerful infrared lasers with a high beam quality are used to investigate the laser welding of bar-wound windings with rectangular cross-sections. The objective is to achieve high weld penetration depths and few pores resulting in contacts with good electrical properties. Furthermore, insulation damages resulting from spatter, a high heat input or a direct interaction with laser radiation have to be avoided. To evaluate the heat distribution in the winding resulting from the welding process, a numerical process model is realized and validated successfully. A simulation study shows the spacial distribution of the maximum temperature of the workpiece, that has to be expected. Interrelationships among process parameters, properties of the workpieces and the achievable quality of the contact are evaluated in experiments. It becomes apparent, that the combination of a high laser power with a fast feed rate is beneficial. To reduce the undercut of the weldseam, the feed movement is extended by additional lines, while shortening the geometry of the feed movements to about 75 % of the conductor's width avoids insulation damages. Ramping the laser power does not reduce the formation of pores but helps to minimize spatter. The application of programmable focusing optics shows, that the properties of the contact deteriorate in the edge area of the processing field. Using this kind of optics, alternative feed geometries influencing the geometry of the contact are investigated. Especially the application of a circular spacial power modulation features advantages regarding process stability and the formation of spatter. However, the resistance of the contact increases slightly. A displacement of the focal plane inside the workpiece reduces the formation of spatter without affecting the properties of the contact. Low beam waist diameters result in reduced average resistances and a worse process stability. To be able to adopt the results of the examination on conductors with varving geometries it is proved, that constant preferences of the laser energy applied per length divided by the height of the conductor result in similar electrical properties of the contacts. The examinations show, that a removal of the insulating enamel without residues is essential, as the electrical properties of the joint as well as the formation of spatter and pores worsen beginning at fluorescence intensities of 10 RFU. Additionally, a growing roughness has a negative influence on absorption, while oxidization shows no influence. Chamfers in the joining area reduce the amount and affect the flow of the molten material resulting in changed properties of the contact. All rotatory and lateral deviations in the positioning of the conductors are addressed in experiments. Especially big joining gaps cause disadvantages, while the influence decreased, when a spacial power modulation is used. It is also shown, that process gases have a positive influence on the formation of spatter.

Based on the experimental results, a reference process for the laser welding of bar-wound windings with rectangular cross-section featuring a high machine capability related to the electrical properties of the contact is derived. Tests simulating environmental conditions show, that a rapid change of temperature doesn't have a significant influence on the sample's electrical properties while they worsen due to vibration without exceeding the specification limits. This can be traced back to samples with pores causing cracks. A benchmark of the reference process with resistance pressure welding, ultrasonic welding and resistance brazing evinces, that laser welding combines the shortest process times and highest process stability. Additionally, it is the only technology where neither thermal damages of the insulating material nor distinct deformation of the conductors appear. The commercial comparison of the technologies shows, that for high production quantities, laser welding reaches the lowest costs for the contacting of a stator.

To empower the examined technology for the application in serial production, interdependencies along the process chain are analyzed to conceive the implementation of the contacting process within the process chain. For that the effect of the dependent input quantity of the contacting process is quantified by means of a regression coefficient. To determine the amount of dispersion, the width of the variance of the process also has to be taken into account. Therefore, either distributions are simulated based on analytical considerations or recorded in measurements. Subsequently the considered interdependencies are structured in a matrix and the essential correlations are identified in a Pareto analysis. This shows, that the offset of the conductors within the lamination resulting from assembly, the joining gap influenced by the clamping process, the depth of the chamfers that is determined by the cutting process and residues of the insulation resulting from the skinning process have to be considered. Compared to the deviations of the reference process, these interdependencies showcase a major influence on the electrical properties of the contact. An adaptive contacting system minimizing the impact of deviating input quantities is conceptualized based on these insights. In a static variant the reaction is based on default dependencies between disturbance variables and process parameters. Enhanced with sensors to measure features relevant to guality and elements of Machine learning, the adaptive system is able to conduct optimizations to reduce process deviations independently.

Due to the comprehensive analysis of the welding and skinning of barwound windings with rectangular cross-sections by means of laser processes, the present thesis creates the fundament for the production of stators with this kind of winding. Since the examinations consider the complex production chain, this work succeeds in integrating the contacting step into the process chain while process stability is increased. This enables the transfer of the results into serial production.

In further research, potentials of new laser technologies for the contacting of bar-wound windings produced from rectangular conductors should be analyzed. In this context, especially the application of shorter wavelengths to weld the copper material, e.g. in the green or blue spectrum, have to be addressed, as soon as systems combining sufficient power and beam quality are available. Additionally, an investigation, if the application of special distributions of the intensity in the focal spot shows advantages, is worthwhile. To optimize the removal of the enamel from the conductor's surface, lasers with shorter pulse durations could be applied.

Based on the findings of this dissertation, a production line suitable for series production has to be conceived and specified. In this context potentials of Machine learning should be deployed to enable further improvements of the contacting process. Supplementary to the development of suitable algorithms it is necessary, to identify sensors that are able to measure relevant process variables.

# 10 Anhang

Auflösung

#### Anhang 1 – Versuchsaufbau Fluoreszenzmessung



0,1 RFU

Kupferlackdraht 4,2 x 2,5 mm [71; 75; 216]		Kupferlackdraht 4,5 x 2,36 mm [71; 75; 216]	
Hersteller	Von Roll France SA	Hersteller	Von Roll France SA
Bezeichnung	Thermex 220 <sup>®</sup> Grade 3 FL	Bezeichnung	Thermex 220 <sup>®</sup> Grade 3 FL
Norm	DIN EN 60317-58	Norm	DIN EN 60317-58
Werkstoff Leiter	Cu-ETP	Werkstoff Leiter	Cu-ETP
Höhe Leiter (Soll)	2,5 mm	Höhe Leiter (Soll)	2,36 mm
Breite Leiter (Soll)	4,2 mm	Breite Leiter (Soll)	4,5 mm
Kantenradius (Soll)	o,8 mm	Kantenradius (Soll)	o,8 mm
Werkstoff Isolation	Polyamidimid (PAI)	Werkstoff Isolation	Polyamidimid (PAI)
Isolationsgrad	Grad 3	Isolationsgrad	Grad 3
Wärmeklasse	220	Wärmeklasse	220
Wärmeschocktemp.	240 °C	Wärmeschocktemp.	240 °C

#### Anhang 2 – Eingesetzte Probekörper und Materialien

#### Kupferlackdraht 4,5 x 0,8 mm [71; 75; 216]

Hersteller	Von Roll France SA
Bezeichnung	Thermex 220 <sup>®</sup> Grade 3 FL
Norm	DIN EN 60317-58
Werkstoff Leiter	Cu-ETP
Höhe Leiter (Soll)	0,8 mm
Breite Leiter (Soll)	4,5 mm
Kantenradius (Soll)	0,4 mm
Werkstoff Isolation	Polyamidimid (PAI)
Isolationsgrad	Grad 3
Wärmeklasse	220
Wärmeschocktemp.	240 °C

#### Kupferlackdraht 4,5 x 2,0 mm [71; 75; 216]

Hersteller	Von Roll France SA
Bezeichnung	Thermex 220 <sup>®</sup> Grade 3 FL
Norm	DIN EN 60317-58
Werkstoff Leiter	Cu-ETP
Höhe Leiter (Soll)	2,0 mm
Breite Leiter (Soll)	4,5 mm
Kantenradius (Soll)	0,65 mm
Werkstoff Isolation	Polyamidimid (PAI)
Isolationsgrad	Grad 3
Wärmeklasse	220
Wärmeschocktemp.	240 °C

#### Kupferlackdraht 4,5 x 3,15 mm [71; 75; 216]

Hersteller	Von Roll France SA
Bezeichnung	Thermex 220 <sup>®</sup> Grade 3 FL
Norm	DIN EN 60317-58
Werkstoff Leiter	Cu-ETP
Höhe Leiter (Soll)	3,15 mm
Breite Leiter (Soll)	4,5 mm
Kantenradius (Soll)	0,8 mm
Werkstoff Isolation	Polyamidimid (PAI)
Isolationsgrad	Grad 3
Wärmeklasse	220
Wärmeschocktemp.	240 °C


Versuchssystem Laserstrahlschweißen [253; 254]			
Strahlquelle	Hersteller	TRUMPF Laser GmbH	
	Bezeichnung	TruDisk 8001	
	laseraktives Medium	Yb:YAG, scheibenförmig	
	Wellenlänge	1030 nm	
	Leistungsbereich	160 W – 8000 W	
	Strahlparameterprodukt	4 mm mrad	
Fokussieroptik	Hersteller	TRUMPF Laser GmbH	
	Bezeichnung	PFO 33-2 HAS	
	Vorschubgeschwindigkeit	0,1 mm/s – 15000 mm/s	
	Kollimation	150 mm	
	Brennweite	255 mm	
	Abbildungsverhältnis	1,7 : 1	
	Arbeitsfeld	180 mm x 104 mm, elliptisch	
Lichtwellenleiter 1ª	Kerndurchmesser	150 µm	
	Strahltaillendurchmesser <sup>b</sup>	255 μm	
	77 I I		
Lichtwellenleiter 2	Kerndurchmesser	200 µm	
	Strahltaillendurchmesser <sup>b</sup>	340 µm	

# Anhang 3 – Versuchssystem

<sup>a</sup> eingesetzte Konfiguration, sofern nicht anders angegeben <sup>b</sup> aus Kombination mit Strahlquelle und Fokussieroptik resultierend



## Anhang 4 – Spannvorrichtung zur Probenaufnahme [S15]

## Anhang 5 – System und Vorgehensweise zur Messung von Widerständen



StromquelleKEIGenauigkeit± 0,

KEITHLEY 62 ± 0,155 mA

#### Messgenauigkeit ± 0,234 µV

#### **Messen Temperatur** [257; 258; 259]

Temperaturfühler	OMEGA SA2C-RTD
Sensor	Pt100
Transmitter	OMEGA TXDIN1600T
Ausgangssignal	Strom, 4 mA – 20 mA
Messgenauigkeit	± 0,4 °C

#### Aufnehmen Probekörper [S6] Messvorrichtung Eigenbau

0	0
Messgenauigkeit	± 0,076 %ª

<sup>a</sup> experimentell ermittelt

#### Vorgehensweise Messung

1.	Probekörper einlegen	manuell
2.	Kontaktieren für Messung	pneumatische Kontaktstifte
3.	Messung	LabView: Deltamessung
4.	Kontaktierung entfernen	LabView: Temperaturmessung pneumatische Kontaktstifte
5.	Probekörper drehen	manuell
6.	Kontaktieren für Messung	pneumatische Kontaktstifte
7.	Messung	LabView: Deltamessung
		LabView: Temperaturmessung
8.	Auswertung Messdaten	LabView: Berechnung Widerstände aus Deltamessungen
9.	Normierung Widerstände	LabView: Berechnung Leitertemperaturen manuell: Normierung Widerstände auf 20 °C manuell: Normierung Widerstand unbeeinflusster Leiter auf Messlänge 30 mm

# Anhang 6 – Versuchsaufbau und Vorgehensweise zur Ermittlung der mechanisierten Schälfestigkeit



# Anhang 7 – Temperaturschockprüfung

2-Kammer-Temperaturschockprüfung [2	40; 260]	
Temperaturprofil	Norm	ISO 16750-4
180 - 12yklus	Prüfanlage untere Temperatur obere Temperatur Verweilzeit Überführungsdauer Anzahl Zyklen Widerstandsmessung	Vötsch VT <sup>3</sup> -40 °C <sup>a</sup> 180 °C <sup>b</sup> 20 min < 30 S 350 nach je 50 Zyklen <sup>a</sup> vorgehaltene Temperatur: -50 °C <sup>b</sup> vorgehaltene Temperatur: 190 °C
0 20 40 Zeit in min		



#### Anhang 8 – Temperaturüberlagerte Vibrationsprüfung

Aufgrund von Restriktionen des eingesetzten Prüfsystems wird

in den Versuchen ein reduzierter Frequenzbereich von 30 Hz bis 1200 Hz abgebildet. In ISO 16750-3 sind Frequenzen von 10 Hz bis 2000 Hz vorgegeben.



# Anhang 9 – Trennvorrichtung [S17]

Ultraschallschweißen	
Versuchsanlage	TELSONIC M4000
Frequenz	20 kHz
Amplitude	90 %
Fahrdruck Sonotrode	3,5 bar
Schweißweg	1,5 mm
Fügelänge	5 mm
Widerstandshartlöten	
Versuchsanlage	AMADA MIYACHI F160
Lot	Umicore 515 BD
Abmessungen Lot	Höhe: 0,1 mm; Breite: 3 mm; Länge: 5 mm
Frequenz	50 Hz
Effektivstrom	3,5 kA
Impulsdauer	2,015 S
Elektrodenkraft	300 N
Widerstandspressschweißen	
Versuchsanlage	Castech GFA301000
Schweißleistung	16,4 kW
Elektrodenkraft	1260 N
Anzahl Impulse	3
Dauer Impuls	0,6 s
Verzögerung zwischen Impulsen	0,6 s

# Anhang 10 – Prozessparameter alternative Fügetechnologien [S11]

	Laserstrahl- schweißen	Ultraschall- schweißen	Widerstands- pressschweißen	Widerstands- hartlöten
Zeiten				
Prozess	0,22 s/ Kontakt	1,4 s/ Kontakt	3,6 s/ Kontakt	2,0 s/ Kontakt
Positionierung	2,4 ms/ Sprung	1,2 s/ Sprung	1,2 s/ Sprung	1,2 s/ Sprung
Lotzufuhr				0,5 s/ Kontakt
Bildverarbeitung <sup>a</sup>	20 s/ Stator			
Ein-/ Ausfahren,	4 S	4 S	4 S	4 <sup>s</sup>
Spannen				
Verschleiß				
Komponente	Schutzglas	Sonotrode	Elektroden	Elektroden
Standzeit [113]	500000 Kontakte	50000 Kontakte	10000 Kontakte	15000 Kontakte
Kosten	200€	1800 €	400€	400€
Dauer Tausch	5 min	20 min	10 min	10 min
Energiekosten				
Anlage <sup>b</sup>	5130 Ws/ Kontakt	3720 Ws/ Kontakt	65600 Ws/ Kontakt	13330 Ws/ Kontakt
Druckluftver-	1,5 m <sup>3</sup> / Stator	vernachlässigt	vernachlässigt	vernachlässigt
brauch	(Crossjet)			
Strompreis [261]	0,185 €/ kWh	0,185 €/ kWh	0,185 €/ kWh	0,185 €/ kWh
Abschreibungen				
Investitionskosten <sup>c</sup>	498000 €	148000 €	145000 €	143000 €
Abschreibungszeit- raum [262]	6 Jahre	6 Jahre	6 Jahre	6 Jahre
Materialkosten				o,69 €/ Stator (Lot)

#### Anhang 11 – Rahmenbedingungen wirtschaftlicher Vergleich

<sup>a</sup> Detektion Lage Leiter und Anpassung Vorschubbewegung <sup>b</sup> von Anlage aufgenommene Energie <sup>c</sup> Kosten für Kontaktierungsstation inkl. Prozesstechnik, Achsen, Einhausung, Werkstückhandhabung, Werkstückaufnahmen,

Spanntechnik; keine Berücksichtigung Kühlung, Absaugung

betrachteter Stator	
Anzahl Nuten Wicklungsaufbau	60 offene Formspulen
Außendurchmesser Stator	250 mm
Anzahl Spulenseiten	4/ Nut rechteckig, 4.2 x 2.5 mm

#### weitere Annahmen

Personalkosten Instandhaltung	42,50 €/ Stunde
Anzahl Werktage	300
Schichtmodell	Zweischichtbetrieb, 8-Stunden-Schichten
OEE	90 %
Automatisierungsgrad	Vollautomatisierung

# Literaturverzeichnis

- [1] BECKER, J.: Lange Leitung. Elektroautos gab es schon vor 130 Jahren, dann war es lange still. Jetzt hat die alte Idee eine große Zukunft. In: Süddeutsche Zeitung, 13. Dezember 2010, S. 41
- [2] YAY, M.: Elektromobilität. Theoretische Grundlagen, Herausforderungen sowie Chancen und Risiken der Elektromobilität, diskutiert an den Umsetzungsmöglichkeiten in die Praxis. 3., durchgesehene Auflage. Frankfurt am Main: PL Academic Research, 2015
- [3] FEV CONSULTING GMBH: Antrieb im Wandel. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Fahrzeugen und ihre Auswirkung auf den Maschinen- und Anlagenbau und die Zulieferindustrie. Frankfurt am Main, 2018
- [4] KARLE, A.: *Elektromobilität. Grundlagen und Praxis.* 2., aktualisierte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2017
- [5] HÜTTL, R.F.; PISCHETSRIEDER, B. und SPATH, D. (Hrsg.): *Elektromobilität. Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen.* Berlin: Springer-Verlag, 2010. acatech diskutiert
- [6] JUNG, D.-S.; KIM, Y.-H.; LEE, U.-H. und LEE, H.-D.: Optimum Design of the Electric Vehicle Traction Motor Using the Hairpin Winding. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 75<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2012
- [7] TZSCHEUTSCHLER, R.; OLBRISCH, H. und JORDAN, W.: *Technologie des Elektromaschinenbaus*. Berlin: Verlag Technik, 1990
- [8] KAMPKER, A.; KREISKÖTHER, K.; KLEINE BÜNING, M.; TREI-CHEL, P. und THEELEN, J.: Automotive quality requirements and process capability in the production of electric motors. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 7<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2017, S. 32-39
- [9] SCHULZE, G.: *Die Metallurgie des Schweissens. Eisenwerkstoffe* -*Nichteisenmetallische Werkstoffe*. 4., neu bearbeitete Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. VDI-Buch

- [10] STAN, C.: Alternative Antriebe für Automobile. Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2015
- [11] NAUNIN, D.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. Technik, Strukturen und Entwicklungen. 4. Auflage. Renningen: expert verlag, 2007. Kontakt & Studium, Band 255
- [12] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: Global EV Outlook 2018. Towards cross-modal electrification. Paris, 2017
- [13] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *Global EV Outlook* 2020. *Entering the decade of electric drive?* Paris, 2020
- [14] SCHLICK, T.; HERTEL, G.; HAGEMANN, B.; MAISER, E. und KRAMER, M.: Zukunftsfeld Elektromobilität. Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Frankfurt am Main, 2011
- [15] KAMPKER, A.; KREISKÖTHER, K.D.; KLEINE BÜNING, M. und TREICHEL, P.: Herausforderung Hairpintechnologie. Technologieschub für OEMs und Anlagenbauer. In: ATZelektronik, 2018, 13(5), S. 62-67. ISSN 1862-1791
- [16] UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COUNCIL: Mutual Resolution No. 2 (M.R.2) of the 1958 and the 1998 Agreements Containing Vehicle Propulsion System Definitions, 2015
- [17] DISPAN, J.; KRUMM, R. und SEIBOLD, B.: Strukturbericht Region Stuttgart 2009. Entwicklung von Wirtschaft und Beschäftigung. Schwerpunkt: Umbruch in der Automobilregion. Stuttgart/ Tübingen, 2009
- [18] ORGANIZATION OF THE PETROLEUM EXPORTING COUN-TRIES: World Oil Outlook 2040. Executive Summary. Wien, 2018
- [19] OLIVER WAYMANN: *Auto & Umwelt 2007*. München, 2007
- [20] KUHNERT, F.; STÜRMER, C. und KOSTER, A.: eascy Die fünf Dimensionen der Transformation der Automobilindustrie, 2017
- [21] EUROPÄISCHE KOMMISSION: The roadmap for transforming the EU into a competitive, low-carbon economy by 2050. Developing long-term, credible climate policies. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/2050\_roadmap\_en. pdf. Überprüfungsdatum: 21. Oktober 2019

- [22] WEIGELT, M.; MAYR, A.; BÖHM, R.; KÜHL, A. und FRANKE, J.: Quo vehis, Elektromobilität? Aktuelle Treiber und Hindernisse der Mobilitätswende in Deutschland. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2018, 113(1-2), S. 59-63. ISSN 0947-0085
- [23] BOULANGER, A.G.; CHU, A.C.; MAXX, S. und WALTZ, D.L.: Vehicle Electrification: Status and Issues. In: Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6), S. 1116-1138. ISSN 0018-9219
- [24] FÜßEL, A.: Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität. Stand der Technik, Forschungsausblick und Projektion auf das Jahr 2025. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017
- [25] MCKINSEY & COMPANY INC.: Boost! Transforming the powertrain value chain – a portfolio challenge, 2011
- [26] PISCHINGER, S. und SEIFFERT, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 8., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ATZ/MTZ-Fachbuch
- [27] HELMS, H.; JÖHRENS, J.; KÄMPER, C.; GIEGRICH, J.; LIEBICH, A.; VOGT, R. und LAMBRECHT, U.: Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. In: UM-WELTBUNDESAMT (Hrsg.): Texte Umweltbundesamt, 27/2016. Dessau-Roßlau, 2016
- [28] GESELLSCHAFT FÜR KONSUMFORSCHUNG: Kriterien für den Kauf eines Elektroautos in Deutschland im Jahr 2018 [Chart]. In: Markenartikel: Das Magazin für Markenführung, 2018, 11/2018, S. 25. ISSN 0342-1236
- [29] BERTRAM, M. und BONGARD, S.: Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr. Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [30] GREENWOOD, D.: Roadmapping the EV Future. Battery technology, mass manufacturing and the prospects ahead. Coil Winding, Insulation and Electrical Manufacturing Exhibition (CWIEME). Berlin, 21. Juni 2017. Verfügbar unter: https://www.coilwinding expo.com/berlin/\_\_media/Speaker-presentations-2017/Day-2-Prof--Dave-Greenwood,-Road-mapping-compressed.pdf. Überprüfungsdatum: 21. Oktober 2019
- [31] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT: Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase. Berlin, 2018

- [32] KAMPKER, A.: *Elektromobilproduktion*. Berlin: Springer Vieweg, 2014
- [33] POPESCU, M.; GOSS, J.; STATON, D.; HAWKINS, D.; CHONG, Y.C. und BOGLIETTI, A.: *Electrical Vehicles - Practical Solutions for Power Traction Motor Systems*. In: IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3), S. 2751-2762. ISSN 0093-9994
- [34] POLLOK, T.; DEDERICHS, T.; SMOLKA, T.; THEISEN, T.; SCHOWE-VON DER BRELIE, B. und SCHNETTLER, A.: *Technical Assessment of Dispersed Electric Vehicles in Medium Voltage Dis tribution Networks*. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 20<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution (CIRED). 2009
- [35] BERRET, M.; MOGGE, F.; SCHLICK, T.; FELLHAUER, E.; SÖNDERMANN, C. und SCHMIDT, M.: *Global Automotive Supplier Study 2016. Being prepared for uncertainties, 2016*
- [36] JUNGINGER, C.: Untersuchung der Stromverdrängung im Ständer hoch ausgenutzter elektrischer Maschinen. Dissertation. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017. AutoUni-Schriftenreihe
- [37] MÜLLER, G.; VOGT, K. und PONICK, B.: *Berechnung elektrischer Maschinen*. 6., völlig neu bearbeitete Auflage. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2008. Elektrische Maschinen, Band 2
- [38] BINDER, A.: *Elektrische Maschinen und Antriebe. Grundlagen, Betriebsverhalten.* Heidelberg: Springer-Verlag, 2012
- [39] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe Grundlagen*. 6., wesentlich überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017. Springer-Lehrbuch
- [40] BINDER, A.: Elektromotorische Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. VDI Wissensforum "Hybrid- und Elektroantriebe für Kraftfahrzeuge". Frankfurt am Main, 9. Juni 2010. Verfügbar unter: https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/vortrge/100609\_bin der\_knopik\_hybrid\_elektrofahrzeuge.pdf. Überprüfungsdatum: 18. Oktober 2019
- [41] GRUNDITZ, E.A. und THIRINGER, T.: Performance Analysis of Current BEVs Based on a Comprehensive Review of Specifications.
   In: IEEE Transactions on Transportation Electrification [online], 2016, 2(3), S. 270-289. ISSN 2332-7782

- [42] OSWALD, J.: Vor- und Nachteile verschiedener Motorkonzepte für Fahrantriebe. DRIVE-E Akademie. Erlangen, 11. März 2010. Verfügbar unter: https://www.drive-e.org/wp-content/uploads/vortrae ge\_2010/13\_Do\_Oswald\_Fahrantriebe.pdf. Überprüfungsdatum: 18. Oktober 2019
- [43] WALLENTOWITZ, H. und FREIALDENHOVEN, A.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner Verlag, 2011. ATZ/MTZ-Fachbuch
- [44] KAWANO, S.; MURAKAMI, H.; NISHIYAMA, N.; IKKAI, Y.; HONDA, Y. und HIGAKI, T.: *High Performance Design of an Interior Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor for Electric Vehicles.* In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of Power Conversion Conference (PCC). 1997, S. 33-36
- [45] MURAKAMI, H.; HONDA, Y.; SADANAGA, Y.; IKKAI, Y.; MORIMOTO, S. und TAKEDA, Y.: Optimum Design of Highly Efficient Magnet Assisted Reluctance Motor. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 36<sup>th</sup> IAS Annual Meeting. 2001, S. 2296-2301
- [46] DU-BAR, C. und WALLMARK, O.: Eddy Current Losses in a Hairpin Winding for an Automotive Application. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 13<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2018, S. 710-716
- [47] BICKEL, B.; HÜBNER, M. und FRANKE, J.: Analyse des Optimierungspotenzials zur Erhöhung des Kupferfüllfaktors in elektrischen Maschinen. In: Beilage im ant Journal, 2014, 53(2), S. 16-21
- [48] JURKOVIC, S.; RAHMAN, K.; BAE, B.; PATEL, N. und SAVAGIAN, P.: Next Generation Chevy Volt Electric Machines. Design, Optimization and Control for Performance and Rare-Earth Mitigation. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2015, S. 5219-5226
- [49] PETER, M.; SELL-LE BLANC, F. und FLEISCHER, J.: *Trends im Elektromaschinenbau. Herausforderungen und aktuelle Entwicklungen der Produktionstechnik.* In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2013, 108(6), S. 435-439. ISSN 0947-0085
- [50] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT: Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung. Berlin, 2014

- [51] AUMANN GMBH: Wellenwickelvorrichtung. Erfinder: LÜTTGE,
  W. Europäische Patentschrift, Veröffentlichungsnr. EP3182568B1.
  o6. Dezember 2017
- [52] SCHIEFER, M.: Indirekte Wicklungskühlung hochausgenutzter permanenterregter Synchronmaschinen mit Zahnspulenwicklung. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe, 2017
- [53] DE GENNARO M.; JÜRGENS, J.; ZANON, A.; GRAGGER, J.;
  SCHLEMMER, E.; FRICASSÈ, A.; MARENGO, L.; PONICK, B.;
  OLABARRI, E.T.; KINDER, J.; CAVALLINI, A.; MANCINELLI, P.;
  HERNANDEZ, M. und MESSAGIE, M.: Designing, prototyping and testing of a ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for hybrid and electric vehicles applications. In: Sustainable Energy Technologies and Assessments [online], 2019, (31),
  S. 86-101. ISSN 2213-1388
- [54] PETER, M.; FLEISCHER, J.; SELL-LE BLANC, F. und JASTRZEMB-SKI, J.-P.: New Conceptual Lightweight Design Approaches for Integrated Manufacturing Processes. Influence of Alternative Materials on the Process Chain of Electric Motor Manufacturing. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2013, S. 206-211
- [55] SAUR, M.; GAONA, D.; ZDRAVKOVIC, J.; HENTSCHEL, F.; LO-RENZ, R.D. und GERLING, D.: Experimental Evaluation of Iron Loss Minimization in Automotive Traction Drives by Increased Disturbance Rejection and Precise Flux Control. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 19<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2016
- [56] LIU, M.; LI, Y.; DING, H. und SARLIOGLU, B.: Thermal Management and Cooling of Windings in Electrical Machines for Electric Vehicle and Traction Application. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 2017, S. 668-673
- [57] REMY INC.: Multi-set rectangular copper hairpin winding for electric machines. Erfinder: CAI, W.; FULTON, D. und CONGDON, C.L. Vereinigte Staaten von Amerika, Veröffentlichungsnr. US7034428B2. 25. April 2006

- [58] DAJAKU, G.; BILYI, V. und GERLING, D.: Feasibility Analysis of an Improved FSCW for Synchronous Reluctance Traction Machines.
   In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). 2017
- [59] DOBROSCHKE, A.: *Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte*. Dissertation. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2011. Fertigungstechnik-Erlangen, Band 219
- [60] RAHMAN, K.M.; JURKOVIC, S.; HAWKINS, S.; TARNOWSKY, S. und SAVAGIAN, P.: Propulsion System Design of a Battery Electric Vehicle. In: IEEE Electrification Magazine, 2014, 2(2), S. 14-24. ISSN 2325-5897
- [61] JUERGENS, J.; FRICASSÈ, A.; MARENGO, L.; GRAGGER, J.; DE GENNARO, M. und PONICK, B.: Innovative Design of an Air Cooled Ferrite Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for Automotive Traction Application. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 12<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2016, S. 803-810
- [62] PARK, H.-J. und LIM, M.-S.: Design of High Power Density and High Efficiency Wound-Field Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction. In: IEEE Access [online], 2019, 7, S. 46677-46685. ISSN 2169-3536
- [63] SANO, H.; AASANUMA, T.; KATAGIRI, H.; MIWA, M.; SEMBA, K. und YAMADA, T.: Loss Calculation of Bar-Wound High-Power-Density PMSMs with Massively Parallel Processing. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). 2017
- [64] RAHMAN, K.M.; JURKOVIC, S.; STANCU, C.; MORGANTE, J. und SAVAGIAN, P.J.: Design and Performance of Electrical Propulsion System of Extended Range Electric Vehicle (EREV) Chevrolet Volt. In: IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3), S. 2479-2488. ISSN 0093-9994
- [65] JURKOVIC, S.; RAHMAN, K.M. und SAVAGIAN, P.J.: Design, Optimization and Development of Electric Machine for Traction Application in GM Battery Electric Vehicle. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2015, S. 1814-1819

- [66] BICKEL, B.; MAHR, A.; MEIXNER, S.; BÄUMLER, M. und FRANKE, J.: Manufacturing Techniques for Improved Electric Traction Drives. In: JEONBUK NATIONAL UNIVERSITY (Hrsg.): Proceeding of the 26<sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM). 2016, S. 520-527
- [67] REMY INTERNATIONAL INC.: Inside the HVH<sup>™</sup> Hybrid Motor. Technical Insights on Remy's "Off-the-Shelf" Hybrid Motor Solutions [online]. White Paper, 2009. Verfügbar unter: http://www.vaxosystems.com/store/images/file/pdf/inside-hvhhybrid-motor.pdf. Überprüfungsdatum: 21. Oktober 2019
- [68] AN, J.; GEMEINDER, Y. und BINDER, A.: Downsizing possibilities of a PM synchronous motor for a hybrid vehicle. In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik [online], 2019, 136(2), S. 143-152. ISSN 1613-7620
- [69] HAGEDORN, J.; SELL-LE BLANC, F. und FLEISCHER, J.: Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren. Ein Beitrag zur Energieeffizienz. Berlin: Springer Vieweg, 2016
- [70] DIN EN 60317-28:2014-10. Festlegungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 28: Flachdrähte aus Kupfer, lackisoliert mit Polyesterimid, Klasse 180 (IEC 60317-28:2013)
- [71] DIN EN 60317-58:2011-06. Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 58: Flachdrähte aus Kupfer, lackisoliert mit Polyamidimid, Klasse 220 (IEC 60317-58:2010)
- [72] DIN EN 60317-30:2006-09. Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 30: Flachdrähte aus Kupfer, lackisoliert mit Polyimid, Klasse 220 (IEC 60317-30:1990 + A1:1997 + A2:2005)
- [73] DIN EN 60317-47:2014-10. Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 47: Flachdrähte aus Kupfer, lackisoliert mit aromatischen Polyimiden, Klasse 240 (IEC 60317-47:2013)
- [74] DIN EN 60317-29:2011-03. Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 29: Flachdrähte aus Kupfer, lackisoliert mit Polyester oder Polyesterimid und darüber mit Polyamidimid, Klasse 200 (IEC 60317-29:1990 + A1:1997 + A2:2010)

- [75] DIN EN 60317-0-2:2014-10. Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 0-2: Allgemeine Anforderungen – Lackisolierte Flachdrähte aus Kupfer (IEC 60317-0-2:2013)
- [76] DIN EN 13602:2013-09. *Kupfer und Kupferlegierungen Gezogener Runddraht aus Kupfer zur Herstellung elektrischer Leiter*
- [77] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT: *Kupfer in der Elektrotechnik Kabel und Leitungen.* Düsseldorf, 2000
- STENZEL, P.; DOLLINGER, P.; RICHNOW, J. und FRANKE, J.: Innovative Needle Winding Method Using Curved Wire Guide in order to Significantly Increase the Copper Fill Factor. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2014, S. 3047-3053
- [79] VENTURINI, M.; ZORZI, A. und MAZZUCCHELLI, M.: Torque/volume increase in Permanent Magnet Synchronous Motors by fill factor enhancement. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). 2018, S. 309-313
- [80] VOGT, S.: Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von verpressten Spulen für effizientere E-Traktionsantriebe. Dissertation, Technische Universität München. München, 2019
- [81] HOFMANN, J.; BOLD, B.; BAUM, C. und FLEISCHER, J.: Investigations on the Tensile Force at the Multi-Wire Needle Winding Process. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 7<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2017, S. 7-12
- [82] GERNGROß, M.; HERRMANN, P.; WESTERMAIER, C. und ENDISCH, C.: *Highly Flexible Needle Winding Kinematics for Traction Stators Based on a Standard Industrial Robot*. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 7<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2017, S. 42-48
- [83] AKITA, H.; NAKAHARA, Y.; MIYAKE, N. und OIKAWA, T.: New Core Structure and Manufacturing Method for High Efficiency of Permanent Magnet Motors. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 38<sup>th</sup> IAS Annual Meeting. 2003, S. 367-372

- [84] FLEISCHER, J.; HAAG, S. und HOFMANN, J.: Quo Vadis Wickeltechnik? Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau [online], 2017. Verfügbar unter: https://www.wbk.kit.edu/downloads/2017\_ 02\_21\_Studie\_Wickeltechnik\_final\_DE.pdf. Überprüfungsdatum: 21. Oktober 2019
- [85] DIN 8593-5:2003-09. Fertigungsverfahren Fügen Teil 5: Fügen durch Umformen
- [86] ZERBE, J.: Innovative Wickeltechnologien für Statorspulen zur Erhöhung des Füllfaktors und Reduzierung der Beanspruchungen im Wickelprozess. Dissertation. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2019. Elektrische Energietechnik an der TU Berlin, Band 4
- [87] DIN 8582:2003-09. Fertigungsverfahren Umformen Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht
- [88] DIN 8593-1:2003-09. Fertigungsverfahren Fügen Teil 1: Zusammensetzen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [89] ISHIGAMI, T.; TANAKA, Y. und HOMMA, H.: Motor Stator With Thick Rectangular Wire Lap Winding for HEVs. In: IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4), S. 2917-2923. ISSN 0093-9994
- [90] WEIGELT, M.; FRÖSCHL, C.; MASUCH, M.; RIEDEL, A. und FRANKE, J.: Erkenntnisse aus der Biegesimulation von Flachdraht. In: DRAHT, 2018, 69(1), S. 18-22. ISSN 0012-5911
- [91] TECNOMATIC S.P.A.: *Method for pre-forming conductors for motor rotors and stators.* Erfinder: GUERCIONI, S. Vereinigte Staaten von Amerika, Veröffentlichungsnr. US7480987B1. 27. Januar 2009
- [92] TECNOMATIC, S.P.A.: *Method for inserting of preformed hairpin conductors into a rotor or stator*. Erfinder: GUERCIONI, S. Vereinigte Staaten von Amerika, Veröffentlichungsnr. US7721413B2. 25. Mai 2010
- [93] TECNOMATIC S.P.A.: *Method for forming motor winding conductors*. Erfinder: GUERCIONI, S. Vereinigte Staaten von Amerika, Veröffentlichungsnr. US7805825B2. 5. Oktober 2010

- [94] TECNOMATIC S.P.A.: Apparatus and method for stripping electrical bar conductors, in particular for bar windings of electrical machines. Erfinder: GUERCIONI, S. Internationale Patentschrift, Veröffentlichungsnr. WO201135596A1. 03. November 2011
- [95] HYUNDAI MOBIS CO., LTD.: Method of binding stator coils of motor. Erfinder: JUNG, D. Vereinigte Staaten von Amerika, Veröffentlichungsnr. US2013/0300232A1. 14. November 2013
- [96] HITACHI, LTD.: Rotierende elektrische Maschine und Wicklungsmethode für deren Stator. Erfinder: UEDA, T.; MORI, Y.; OKAMURA, M.; ISHIDA, S. und WATANABE, T. Europäische Patentschrift, Veröffentlichungsnr. EP1469579B1. 08. April 2009
- [97] LANDGRAF, M.: Flexible Fertigung von Elektromotoren für Fahrzeuge. Land fördert Projekt "AnStaHa" am KIT mit 1,2 Millionen Euro – Forschung stärkt Zukunftsfähigkeit mittelständischer Unternehmen in Baden-Württemberg. Karlsruhe, 6. September 2017. Verfügbar unter: https://idw-online.de/de/attachmentdata58407. pdf. Überprüfungsdatum: 4. Februar 2019
- [98] FYHR, P.; DOMINGUES, G.; REINAP, A.; ANDERSSON, M. und ALAKÜLA, M.: Performance and Manufacturability Tradeoffs of Different Electrical Machine Designs. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). 2017
- [99] JORDAN, W.: Technologie kleiner Elektromaschinen Teil 1. Wissensspeicher für Produktentwickler, Techniker und Kaufleute. 7. Auflage. Dresden: Eigenverlag technoexpert, 2013
- [100] BRAUNOVIC, M.; MYSHKIN, N.K. und KONCHITS, V.V.: Electrical contacts. Fundamentals, applications and technology. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis, 2007. Electrical and Computer Engineering, Volume 132
- [101] SCHMIDT, P.A.: Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen. Dissertation. München, 2015. Forschungsberichte IWB, Band 304
- [102] FORD GLOBAL TECHNOLOGIES LLC: Hairpin Winding Electric Machine with Staggered Hairpin Connections. Erfinder: LE-ONARDI, F. und LIANG, F. Vereinigte Staaten von Amerika, Veröffentlichungsnr. US2019/0288574A1. 19. September 2019

- [103] GÄBLER, F.: Optimizing Automotive Welding Applications with CleanWeld. In: PhotonicsViews [online], 2019, 16(4), S. 52-55. ISSN 2626-1308
- [104] HEIDER, A.: Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm. Dissertation. München: Herbert Utz Verlag, 2018. Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW
- [105] EISENREICH, N.; AECKERLE, M.; BANTEL, C.; HEIDER, A. und OLOWINSKY, A.: *Influence of laser parameters on tensile shear strength of copper welds*. In: Journal of Laser Applications [online], 2019, 31(022411), S. 1-11. ISSN 1938-1387
- [106] TOMCIC, L.; RETTICH, T. und ZÄH, M.F.: Green High-Power Disk Lasers and Industrial Applications. In: PhotonicsViews, 2020, 17(2), S. 57-59. ISSN 2626-1294
- [107] SCHÄFER, H. (Hrsg.): Elektrische Antriebstechnologie für Hybridund Elektrofahrzeuge. Tübingen: expert verlag, 2019. Haus der Technik Fachbuch, Band 149
- [108] LYNCH, D.P.; DUFF, W.S. und FLEISCHMANN, J.E.: Investigation into Terminating Ignition Coil Primary Magnet Wire Without Prior Removal of Insulation. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference. 2001, S. 73-80
- [109] BRUNT, B.E.: Coil Termination Technology an Overview of the Various Methods Available. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference. 2003, S. 523-526
- [110] DIN EN 60352-2:2014-04. Lötfreie Verbindungen Teil 2: Crimpverbindungen – Allgemeine Anforderungen, Prüfverfahren und Anwendungshinweise (IEC 60352-2:2006 + A1:2013)
- [11] KATZIER, H.: Elektrische Steckverbinder. Technologien, Anwendungen und Anforderungen. Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2012
- [112] MROCZKOWSKI, R.S.; JUGY, R.; GERFER, A. und ROBIK, T.: Trilogie der Steckverbinder. Applikationshandbuch zur optimierten Steckverbinderauswahl. 2. erweiterte und überarbeitete Auflage. Künzelsau: Swiridoff Verlag, 2013

- SPRENG, S.: Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimpprozesses. Dissertation. Erlangen: FAU University Press, 2020. FAU Studien aus dem Maschinenbau, Band 340
- [114] DIN 8593-0:2003-09. Fertigungsverfahren Fügen Teil o: Allgemeines - Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [115] DIN 8593-6:2003-09. Fertigungsverfahren Fügen Teil 6: Fügen durch Schweißen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [116] DVS 2812:2002-11. Prüfen von widerstandsgeschweißten Verbindungen in der Elektronik und Feinwerktechnik – Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfungen
- [117] FAHRENWALDT, H.J.; SCHULER, V. und TWRDEK, J.: *Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung.* 5., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [118] DIN 1910-100:2008-02. Schweißen und verwandte Prozesse Begriffe – Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005
- [119] FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V. und SPUR, G. (Hrsg.): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren.* 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014. Handbuch Fertigungstechnik
- [120] AGAPIOU, J.S. und PERRY, T.A.: Resistance mash welding for joining of copper conductors for electric motors. In: Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(4), S. 549-557. ISSN 1526-6125
- [121] PETERSON, W.; GOULD, J.; AGAPIOU, J.; PERRY, T.A. und SCHROTH, J.G.: Resistance Spot Mash Welding of Cu Wires for Electric Car Batteries and Motors, 2015. Verfügbar unter: https://ewi.org/wp-content/uploads/2015/09/Resistance-Spot-Mash-Welding.pdf. Überprüfungsdatum: 1. März 2019
- [122] DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEIßEN UND VERWANDTE VERFAHREN E. V.: *Fügetechnik, Schweißtechnik.* 7., aktualisierte und erw. Aufl. Düsseldorf: DVS Media, 2007
- [123] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT: Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen. Düsseldorf, 2009

- [124] MATTHES, K.-J. und SCHNEIDER, W. (Hrsg.): Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. 5., neu bearbeitete Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2012
- [125] ANAND, K.; ELANGOVAN, S. und RATHINASURIYAN, C.: Modeling and prediction of weld strength in ultrasonic metal welding process using artificial neural network and multiple regression method. In: Material Science & Engineering International Journal [online], 2018, 2(2), S. 39-46. ISSN 2574-9927
- [126] ELANGOVAN, S.; PRAKASAN, K. und JAIGANESH, V.: Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(1-4), S. 163-171. ISSN 0268-3768
- [127] ASAMI, T.; TAMADA, Y.; HIGUCHI, Y. und MIURA, H.: Ultrasonic metal welding with a vibration source using longitudinal and torsional vibration transducers. In: Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(07JE02), S. 1-7. ISSN 0021-4922
- [128] WODARA, J.: Ultraschallfügen und -trennen. Düsseldorf: DVS-Verlag, 2004
- [129] GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS LLC: Arc Welding/Brazing Process for Low-heat Input Copper Joining. Erfinder: SCHROTH, J.G.; PERRY, T.A.; AGAPIOU, J.S. und LESPERANCE, R.M. Vereinigte Staaten von Amerika, Veröffentlichungsnr. US10213878B2. 26. Februar 2019
- [130] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT: Trennen und Verbinden von Kupfer und Kupferlegierungen. Düsseldorf, 2005
- [131] DIN 8593-7:2003-09. Fertigungsverfahren Fügen Teil 7: Fügen durch Löten - Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [132] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT: Löten von Kupfer und Kupferlegierungen. Düsseldorf, 2015
- [133] DIN ISO 857-2:2007-03. Schweißen und verwandte Prozesse Begriffe – Teil 2: Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe (ISO 857-2:2005)
- [134] DIN 8593-3:2003-09. Fertigungsverfahren Fügen Teil 3: Anpressen, Einpressen Einordnung, Unterteilung, Begriffe

- [135] TE CONNECTIVITY CORPORATION: *Trends in Magnet Wire Termination*. White Paper, 2017
- [136] UNIMET GMBH: Advanced Interconnections: IDC-Technology. Insulation Dsiplacement Contact. White Paper. Rieden, 2018
- [137] DENSO CORP.: Electronic device and pressure contact terminal. Erfinder: MATSUMOTO, E. Japan, Veröffentlichungsnr. JP2018-55938A. 05. April 2018
- [138] ROSENBERGER HOCHFREQUENZTECHNIK GMBH & CO. KG: Crimp-Schweißverbindung. Erfinder: BALDAUF, W. und HUND-SEDER, M. Deutschland, Veröffentlichungsnr. DE102014006244A1. 29. Oktober 2015
- [139] ROBERT BOSCH GMBH: Elektrische Verbindung paarweiser Leiterenden und Verfahren zur Herstellung der Verbindung. Erfinder: WOLF, G. Deutschland, Veröffentlichungsnr. DE102009001850A1.
   30. September 2010
- BROSE FAHRZEUGTEILE GMBH & CO. KG: Verfahren zur Verbindung zweier Leiter, insbesondere mit einer Isolierschicht. Erfinder: PSZOLA, P. Deutschland, Veröffentlichungsnr. DE102016203386A1. 08. September 2016
- [141] BRODA, T.: Entwicklung von Anwendungsrichtlinien zum Kompaktieren und Schweißen von Kupfer und Aluminiumlitzen mit konduktiver Widerstandserwärmung. Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben 17395 BR. Halle, 2014
- [142] MATOS, S.; VELOSO, F.; SANTOS, C.; GONÇALVES, L. und CAR-VALHO, E.: *Characterization of Ultrasonic Metal Welding Process*. In: Journal of Environmental Science and Engineering A, 2018, 7(3), S. 125-131. ISSN 2162-5298
- [143] DOMININGHAUS, H.; ELSNER, P.; EYERER, P. und HIRTH, T. (Hrsg.): Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. 8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. VDI-Buch
- [144] BECKMÖLLER, S.: Wickeldrähte ein High-Tech-Produkt. Möglichkeiten und Grenzen. In: Tagungsband des FAPS-TT Fachworkshops "Elektromaschinenbau - Aktuelle Entwicklungen in der Wickeltechnik". Nürnberg, 24. April 2013

- [145] KAISER, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure. Von der Synthese bis zur Anwendung. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2016
- [146] BAUR, E.; BRINKMANN, S.; OSSWALD, T.A.; RUDOLPH, N. und SCHMACHTENBERG, E. (Hrsg.): Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 31. Ausgabe. München: Carl Hanser Verlag, 2013
- [147] SCHWERING & HASSE ELEKTRODRAHT GMBH: *SHTherm*<sup>®</sup> 200. Produktdatenblatt. Lügde, 2018
- [148] ZEUS INDUSTRIAL PRODUCTS INC.: PEEK Insulated Wire [online]. Verfügbar unter: https://www.zeusinc.com/products/in sulated-wire/peek-insulated-wire. Überprüfungsdatum: 20. Februar 2019
- [149] DIN 8580:2003-09. Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung
- [150] DIN 8590:2003-09. Fertigungsverfahren Abtragen Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [151] MICROCHEMICALS GMBH: *TechniStrip® P1316 Hochleistungs-Stripper*. Technisches Datenblatt. Ulm, 2016
- [152] BAUMÜLLER NÜRNBERG GMBH: Entfernen von Oxidschichten von einer Metalloberfläche insbesondere beim Abisolieren von lackisolierten Kupferdrähten. Erfinder: LEMKE, P. Deutschland, Veröffentlichungsnr. DE 102008002079A1. 27. August 2009
- [153] ROBERT BOSCH GMBH: Verfahren und Vorrichtung zum Abisolieren eines isolierten Drahtes. Erfinder: IMMLER, N.; KOEPPE, T. und LUTZ, B. Deutschland, Veröffentlichungsnr. DE102008043876A1. 20. Mai 2010
- [154] WOBBEN, ALOYS: Vorrichtung und Verfahren zum induktiven Abisolieren von Drähten und/oder Profilen. Erfinder: MARYNIAK, B.; SAATHOFF, T.; CLAAßEN, T.; FLEISCHER, M. und WAGENAAR, C. Deutschland, Veröffentlichungsnr. DE102011004078A1. 16. August 2012
- [155] DIN 8589-0:2003-09. Fertigungsverfahren Spanen Teil o: Allgemeines - Einordnung, Unterteilung, Begriffe

- [156] SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT BERLIN UND MÜNCHEN: Handgerät zum staubfreien Abisolieren der Enden von Wicklungen in elektrischen Maschinen. Erfinder: PUTZ, W. Europäische Patentschrift, Veröffentlichungsnr. EP0068238B1. 24. September 1986
- [157] DIN 8589-8:2003-09. Fertigungsverfahren Spanen Teil 8: Bürstspanen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [158] DIN 8589-9:2003-09. Fertigungsverfahren Spanen Teil 9: Schaben, Meißeln - Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [159] ZF FRIEDRICHSHAFEN AG: Circuitry arrangement for an electric motor/machine. Erfinder: WILLACKER, K.; WIEDER, C.; WITT-MANN, J.; LINDWURM, R.; WITTSTADT, R.; SCHMITT, D.; CU-DOK, M.; BYZIO, B.; SCHÄFLEIN, A. und VAN HEYDEN, M. Vereinigte Staaten von Amerika, Veröffentlichungsnr. US20190068021A1. 28. Februar 2019
- [160] JÜSTEL, T. und SCHWUNG, S.: *Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz.* Berlin: Springer Spektrum, 2016
- [161] HÜGEL, H. und GRAF, T.: Laser in der Fertigung. Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. 2., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner Verlag, 2009
- [162] POPRAWE, R.: Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur. Berlin: Springer-Verlag, 2005. VDI-Buch
- [163] HEß, A.: Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit. Dissertation. München: Herbert Utz Verlag, 2012. Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW
- [164] HERRMANN, D. und HERZOG, P.: Laser welding of copper. Copper's special properties call for strategic remote techniques. In: Industrial Laser Solutions for manufacturing [online], 2013, 28(1). ISSN 1523-4266

- BLOM, A.; DUNIAS, P.; VAN ENGEN, P.; HOVING, W. und DE KRAMER, J.: Process spread reduction of laser microspot welding of thin copper parts using real-time control. In: PIQUÉ A.; GEOHE-GAN, D.B.; BACHMANN, F.G.; SUGIOKA, K.; TRÄGER, F.; DUBOWSKI, J.J.; HERMAN P.R.; HOVING, W.; MURAKAMI, K.; WASHIO, K.; FIERET, J. (Hrsg.): Proceedings of SPIE, Volume 4977: High-Power Lasers and Applications Photon Processing in Microelectronics and Photonics II [online]. 2003, S. 493-507
- [166] ENGLER, S.; RAMSAYER, R. und POPRAWE, R.: Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and Infrared Lasers. In: SCHMIDT, M.; ZAEH, M.; GRAF, T.; OSTENDORF A. (Hrsg.): Physics Procedia, Volume 12, Part B: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International WLT Conference on Lasers in Manufacturing. Amsterdam: Elsevier. 2011, S. 339-346
- [167] MANN, V.; HUGGER, F.; ROTH, S. und SCHMIDT, M.: Influence of temperature and wavelength on optical behavior of copper alloys. In: Applied Mechanics and Materials, 2014, 655, S. 89-94. ISSN 1662-7482
- [168] RUMBLE, J.R. (Hrsg.): CRC Handbook of Chemistry and Physics.
  100<sup>th</sup> Edition (Internet Version 2019). Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis, 2019
- [169] FABBRO, R.; SLIMANI, S.; DOUDET, I.; COSTE, F. und BRIAND,
  F.: Experimental study of the dynamical coupling between the induced vapour plume and the melt pool for Nd-Yag CW laser welding. In: Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(2), S. 394-400. ISSN 0022-3727
- [170] KAISER, E.; HUBER, R.; STOLZENBURG, C. und KILLI, A.: Sputter-free and Uniform Laser Welding of Electric or Electronical Copper Contacts with a Green Laser [online]. Industrial Paper auf der 8<sup>th</sup> International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE 2014). Fürth, 2014. Verfügbar unter: www.laneconference.org/app/download/11537107949/LANE2014\_Kaiser\_ Sputter-free\_and\_Uniform.pdf?t=1490707636. Überprüfungsdatum: 21. Oktober 2019

- [171] FUJINAGA, S.; TAKENAKA, H.; NARIKIYO, T.; KATAYAMA, S. und MATSUNAWA, A.: Direct observation of keyhole behaviour during pulse modulated high-power Nd:YAG laser irradiation. In: Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(5), S. 492-497. ISSN 0022-3727
- [172] SCHAUMBERGER, K.; BECK, M.; SAFFER, J.; KAUFMANN, F.; ER-MER, J.; ROTH, S. und SCHMIDT, M.: Improving process reliability by means of detection of weld seam irregularities in copper via thermographic process monitoring. In: AKSELSEN, O.M.; BUNAZIV, I. (Hrsg.): Procedia Manufacturing, Volume 36: Proceedings of Nordic Laser Material Processing Conference (NOLAMP), 36. Amsterdam: Elsevier. 2019, S. 58-63
- [173] HEIDER, A.; SOLLINGER, J.; ABT, F.; BOLEY, M.; WEBER, R. und GRAF, T.: *High-speed X-Ray analysis of spatter formation in laser welding of copper*. In: EMMELMANN, C.; ZAEH M.F., GRAF, T.; SCHMIDT, M. (Hrsg.): Physics Procedia, Volume 41: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International WLT Conference on Lasers in Manufacturing. Amsterdam: Elsevier. 2013, S. 112-118
- [174] EICHLER, H.J. und EICHLER, J.: Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen. 8., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2015
- [175] EICHLER, J.; DÜNKEL, L. und EPPICH, B.: Die Strahlqualität von Lasern. Wie bestimmt man Beugungsmaßzahl und Strahldurchmesser in der Praxis? In: Laser Technik Journal, 2004, 1(2), S. 63-66. ISSN 1613-7728
- STEEN, W.M. und MAZUMDER, J.: Laser material processing. 4<sup>th</sup>
  Edition. London: Springer-Verlag, 2010
- [177] DAUSINGER, F.: Strahlwerkzeug Laser: Energiekopplung und Prozesseffektivität. Habilitation. Stuttgart: B. G. Teubner Verlag, 1995.
   Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW
- [178] PELAPRAT, J.-M.; FINUF, M.; FRITZ, R. und ZEDIKER, M.: Seeing Things in a New Light. High power blue lasers for metal processing.
   In: Laser Technik Journal, 2018, 15(4), S. 39-41. ISSN 1613-7728

- [179] FINUF, M.; REAM, S.; GRAY, B.; PELAPRAT, J.M.; ZEDIKER, M. und FRITZ, R.: Stable conduction and keyhole welding of copper with 275 watt blue laser. In: WISSENSCHAFTLICHE GESELL-SCHAFT LASERTECHNIK E.V. (Hrsg.): Proceedings of Lasers in Manufacturing (LiM). 2017
- BAUMANN, M.; BALCK, A.; MALCHUS, J.; CHACKO R.V. und MARFELS, S.: 1000 W blue fiber-coupled diode-laser emitting at 450 nm. In: ZEDIKER, M.S. (Hrsg.): Proceedings of SPIE, Volume 10900: SPIE LASE - High-Power Diode Laser Technology XVII [online]. 2019, S. 3
- [181] ALTER, L.; HEIDER, A. und BERGMANN, J.-P.: Investigations on copper welding using a frequency-doubled disk laser and high welding speeds. In: SCHMIDT, M.; VOLLERTSEN, F.; DEARDEN, G. (Hrsg.): Procedia CIRP, Volume 74: Proceedings of 10<sup>th</sup> CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE). Amsterdam: Elsevier. 2018, S. 12-16
- [182] DOLD, E.-M.; KAISER, E.; KLAUSMANN, K.; PRICKING, S. und ZASKE, S.: *High-performance welding of copper with green multikW continuous wave disk lasers*. In: KAIERLE, S.; HEINEMANN, S.W. (Hrsg.): Proceedings of SPIE, Volume 10911: SPIE LASE -High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VIII [online]. 2019, S. 28
- [183] RAMSAYER, R.M.; ENGLER, S. und SCHMITZ, G.: New Approaches for Highly Productive Laser Welding of Copper Materials.
  In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 1<sup>st</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2011, S. 97-101
- [184] HESS, A.; SCHUSTER, R.; HEIDER, A.; WEBER, R. und GRAF, T.: Continuous Wave Laser Welding of Copper with Combined Beams at Wavelengths of 1030nm and of 515nm. In: SCHMIDT, M.; ZAEH, M.; GRAF, T.; OSTENDORF, A. (Hrsg.): Physics Procedia, Volume 12, Part A: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International WLT Conference on Lasers in Manufacturing. Amsterdam: Elsevier. 2011, S. 88-94

- [185] LIEBL, S.; WIEDENMANN, R.; GANSER, A.; SCHMITZ, P. und ZAEH, M.F.: Laser Welding of Copper Using Multi Mode Fiber Lasers at Near Infrared Wavelength. In: SCHMIDT, M.; VOL-LERTSEN, F.; MERKLEIN, M. (Hrsg.): Physics Procedia, Volume 56: Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE). Amsterdam: Elsevier. 2014, S. 591-600
- [186] WIEDENMANN, R.; BELITZKI, A.; ZÄH, M.F.; DAUB, R.; SCHILP, H. und KOHNHÄUSER, M.: Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoff mit unterschiedlichen Strahlquellen. In: wt Werkstattstechnik online, 2013, 103(6), S. 470-475. ISSN 1436-4980
- [187] PETRING, D. und GONEGHANY, V.N.: Parameter Dependencies of Copper Welding with Multi-kW Lasers at 1 Micron Wavelength. In: SCHMIDT, M.; ZAEH, M.; GRAF, T.; OSTENDORF, A. (Hrsg.): Physics Procedia, Volume 12, Part A: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International WLT Conference on Lasers in Manufacturing. Amsterdam: Elsevier. 2011, S. 95-104
- [188] MIYAGI, M. und ZHANG, X.: Investigation of laser welding phenomena of pure copper by x-ray observation system. In: Journal of Laser Applications [online], 2015, 27(042005), S. 1-9. ISSN 1938-1387
- [189] FABBRO, R.: *Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding*. In: Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(445501), S. 1-9. ISSN 0022-3727
- [190] GEDICKE, J.; OLOWINSKY, A.; ARTAL, J. und GILLNER, A.: Influence of temporal and spatial laser power modulation on melt pool dynamics. In: LASER INSTITUTE OF AMERICA (Hrsg.): Proceedings of 26<sup>th</sup> International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing (ICALEO) [online]. 2007, S. 816-822
- [191] HAEUSLER, A.; SCHÜRMANN, A.; SCHÖLER, C.; OLOWINSKY, A.; GILLNER, A. und POPRAWE, R.: Quality improvement of copper welds by laser microwelding with the usage of spatial power modulation. In: Journal of Laser Applications [online], 2017, 29(022422), S. 1-7. ISSN 1938-1387

- [192] MIYAGI, M.; ZHANG, X.; KAWAHITO, Y. und KATAYAMA, S.: Surface void suppression for pure copper by high-speed laser scanner welding. In: Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240, S. 52-59. ISSN 0924-0136
- [193] FRANCO, D.F.: *Wobbling laser beam welding of copper*. Dissertation, Universidade Nova de Lisboa. Lissabon, 2017
- [194] HEIDER, A.; STRITT, P.; HESS, A.; WEBER, R. und GRAF, T.: Process Stabilization at welding Copper by Laser Power Modulation. In: SCHMIDT, M.; ZAEH, M.; GRAF, T.; OSTENDORF, A. (Hrsg.): Physics Procedia, Volume 12, Part A: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International WLT Conference on Lasers in Manufacturing. Amsterdam: Elsevier. 2011, S. 81-87
- [195] SCHWEIER, M.: Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation. Dissertation. München: Herbert Utz Verlag, 2016. Forschungsberichte IWB, Band 310
- [196] JARWITZ, M.; FETZER, F.; STRITT, P.; WEBER, R. und GRAF, T.: Influence of laser power modulation on the time-resolved temperature distribution in the weld pool during laser welding of copper to aluminum. In: WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT LASER-TECHNIK E.V. (Hrsg.): Proceedings of Lasers in Manufacturing (LiM). 2015
- [197] KAMPKER, A.; TREICHEL, P.; KREISKÖTHER, K.D.; KREBS, M. und KLEINE BÜNING, M.: *Ex-Ante Process-FMEA for Hairpin Stator Production by Early Prototypical Production Concepts*. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 8<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2018, S. 141-147
- [198] TOUTENBURG, H. und KNÖFEL, P.: *Six Sigma. Methoden und Statistik für die Praxis.* 2., verbesserte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2009
- [199] SCHRÖDER, J.: Verfahren zum nebenzeitlosen Laser-Schweißen von Werkstücken in einer Fertigungslinie und Vorrichtung zur Durchführung desselben. Deutschland, Veröffentlichungsnr. DE19630521A1
- [200] SIEGERT, K. (Hrsg.): *Blechumformung. Verfahren, Werkzeuge und Maschinen.* Berlin: Springer Vieweg, 2015. VDI-Buch

- [201] WAFIOS AG: WAFIOS entwickelt neues revolutionäres Rotationszugbiegeverfahren für die Hairpinherstellung. Verfügbar unter: https://www.wafios.com/uploads/media/Rotationszugbiegever fahren\_fuer\_die\_Hairpinherstellung.pdf. Überprüfungsdatum: 14. August 2019
- [202] BRODBECK, M.: Challenges in Hair Pin Protection. In: Industrial Transcript of 8<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC) [digital]. Schweinfurt, 2018
- [203] DIETRICH, E. und SCHULZE, A.: *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. 7., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014
- [204] DIN ISO 22514-2:2019-01. Statistische Verfahren im Prozessmanagement – Fähigkeit und Leistung – Teil 2: Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen von zeitabhängigen Prozessmodellen (ISO 22514-2:2017)
- [205] HEDDERICH, J. und SACHS, L.: *Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R.* 16., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2018
- [206] KLEPPMANN, W.: Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. 9., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2016. Praxisreihe Qualitätswissen
- [207] PFEIFER, T. und SCHMITT, R. (Hrsg.): Masing Handbuch Qualitätsmanagement. 6., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014
- [208] BARTLETT, M.S.: Fitting a Straight Line When Both Variables are Subject to Error. In: Biometrics, 1949, 5(3), S. 207-212. ISSN 0006-341X
- [209] FRANZ, C. und BRUCHWALD, O.: Process Monitoring in E-Mobility Applications. In: PhotonicsViews, 2020, 17(3), S. 64-68. ISSN 2626-1294
- [210] DIN EN 60851-6:2013-03. Wickeldrähte Prüfverfahren Teil 6: Thermische Eigenschaften (IEC 60851-6:2012)
- [211] FÖRSTER, T.: *Fluoreszenz organischer Verbindungen*. Unveränderter Nachdruck der 1. Auflage. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1982

- [212] BECHMANN, W. und BALD, I.: *Einstieg in die Physikalische Chemie für Naturwissenschaftler*. 6. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2018. Studienbücher Chemie
- [213] LATSCHA, H.P.; KAZMAIER, U. und KLEIN, H.A.: Organische Chemie. Chemie-Basiswissen II. 7. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2016. Springer-Lehrbuch
- [214] SITA MESSTECHNIK GMBH: SITA CleanoSpector Messprinzip. Dresden, 2014
- [215] SITA MESSTECHNIK GMBH: *Fluoreszenz Definition der Mess*größe. Dresden, 2017
- [216] VON ROLL FRANCE SA: Enamelled wires. Thermex 220<sup>®</sup> Grade 3 FL. Produktdatenblatt. Delle, 2017
- [217] DIN EN 60317-0-1:2014-09:2014-09. Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 0-1: Allgemeine Anforderungen – Runddrähte aus Kupfer, lackisoliert
- [218] SITA MESSTECHNIK GMBH: *SITA CleanoSpector*. Betriebsanleitung, Revision 10. Dresden, 2013
- BÜCHTER, E.: "Cleaning with Light". Laser beam surface treatment opens up a wide range of industrial applications thanks to state-ofthe-art laser technology. In: Laser Technik Journal, 2018, 15(2), S. 36-39. ISSN 1613-7728
- [220] SPECTRUM TECHNOLOGIES PLC: Laser removal of layer or coating from a substrate. Erfinder: THOMAS, A.; DAVIES, J. und DICKINSON, P.H. Europäische Patentschrift, Veröffentlichungsnr. EP1641572B1. 28. Dezember 2011
- [221] DAVIES, J.; DICKINSON, P. und HAWKINS, R.: Developments in High Speed, High Quality, Precision Laser Stripping of Enamel Wire for Coil Winding Manufacturing Applications. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 5<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2015, S. 31-35
- [222] STMICROELECTRONICS S.R.L.; ARGES GMBH: Method for removing molding residues in the fabrication of plastic packages for semiconductor devices. Erfinder: CREMA, P.; TIZIANI, R. und GUGGENMOS, M. Vereinigte Staaten von Amerika, Veröffentlichungsnr. US6468356B1. 22. Oktober 2002
- [223] KRAMER, T.; NEUENSCHWANDER, B.; JÄGGI, B.; REMUND, S.; HUNZIKER, U. und ZÜRCHER, J.: *Influence of Pulse Bursts on the Specific Removal Rate for Ultra-fast Pulsed Laser Micromachining of Copper.* In: Physics Procedia, 2016, 83, S. 123-134
- [224] AMS AG: *AS*7262. 6-Channel Visible Spectral\_ID Device with Electronic Shutter and Smart Interface. Produktdatenblatt, Revision 1-01. Premstätten, 2017
- [225] DVS 2813:2009-02. Widerstandsschweißen von elektrischen Kontakten
- [226] BUSCH, R.: *Elektrotechnik und Elektronik*. 7., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- [227] BĂLĂ, C.; FETIȚA, A. und LEFTER, V.: Handbuch der Wickeltechnik elektrischer Maschinen. Theorie, Konstruktion und Technologie von Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen. Übersetzung aus dem Rumänischen: WASS, N. 2., stark bearbeitete Auflage. Berlin: Verlag Technik, 1976
- [228] VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEIN-GENIEURWESEN (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. 11., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2013. VDI-Buch
- [229] POLYTRON KUNSTSTOFFTECHNIK GMBH & CO. KG: Materialdatenblatt Torlon 4203 (PAI). Bergisch Gladbach, 2012. Verfügbar unter: https://www.polytron-gmbh.de/torlon-typen.aspx. Überprüfungsdatum: 24. April 2019
- [230] MÜLLER, G. und GROTH, C.: FEM für Praktiker. Die Methode der Finiten Elemente mit dem FE-Programm ANSYS. 4., aktualisierte Auflage. Renningen-Malmsheim: expert verlag, 1990. Edition expertsoft, Band 23
- [231] SRIVASTAVA, A.: ANSYS. Moving Heat Source Version 4.1, 2016
- [232] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 1. Mechanik und Wärme.* 6., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2013. Springer-Lehrbuch
- [233] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT: *Cu-ETP*. Werkstoffdatenblatt. Düsseldorf, 2005
- [234] VINARICKY, E. (Hrsg.): Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, Technologien, Pr
  üfverfahren. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2016

- [235] MÜHL, T.: *Elektrische Messtechnik. Grundlagen, Messverfahren, Anwendungen.* 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017
- [236] KEITHLEY INSTRUMENTS INC.: Achieving Accurate and Reliable Resistance Measurements in Low Power and Low Voltage Applications. White Paper. Cleveland, 2004
- [237] KEITHLEY INSTRUMENTS INC.: Making Precision Low Voltage and Low Resistance Measurements. Cleveland, 2013
- [238] DIN EN ISO 14270:2016-11. Widerstandsschweißen Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen – Probenmaße und Verfahren für die mechanisierte Schälprüfung an Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln (ISO 14270:2016)
- [239] ISO 16750-1:2003-12. Road vehicles Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment Part 1: General
- [240] ISO 16750-4:2010-04. Road vehicles Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - Part 4: Climatic loads
- [241] ISO 16750-3:2012-12. Road vehicles Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - Part 3: Mechanical loads
- [242] NAGEL, F.; STAMBKE, M. und BERGMANN, J.P.: Reduction of spatter formation by superposition of two laser intensities. In: LA-SER INSTITUTE OF AMERICA (Hrsg.): Proceedings of 35<sup>th</sup> International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing (ICALEO) [online]. 2016, S. 1502–1509
- [243] NAGEL, F.; BRÖMME, L. und BERGMANN, J.P.: Description of the influence of two laser intensities on the spatter formation on laser welding of steel. In: SCHMIDT, M.; VOLLERTSEN, F.; DEARDEN, G. (Hrsg.): Procedia CIRP, Volume 74: Proceedings of 10<sup>th</sup> CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE). Amsterdam: Elsevier. 2018, S. 475-480
- [244] AUWAL, S.T.; RAMESH, S.; YUSOF, F. und MANLADAN, S.M.: A review on laser beam welding of copper alloys. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1-4), S. 475-490. ISSN 0268-3768

- [245] VDI 2906 Blatt 2:1994-05. Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall - Scherschneiden
- [246] AIR LIQUIDE S.A.: *ALPHAGAZ™ 1 HELIUM.* Produktdatenblatt, Revision 04/2008-v2. Düsseldorf, 2008
- [247] AIR LIQUIDE S.A.: ARCAL Prime. Produktdatenblatt, Revision 01/2010-v03. Düsseldorf, 2010
- [248] WEMAN, K. (Hrsg.): Welding Processes Handbook. 2<sup>nd</sup> Edition.
   Cambridge: Woodhead Publishing, 2012
- [249] MATSUMOTO, T.; FUJII, H.; UEDA, T.; KAMAI, M. und NOGI, K.: Measurement of surface tension of molten copper using the free-fall oscillating drop method. In: Measurement Science and Technology, 2005, 16(2), S. 432-437. ISSN 0957-0233
- [250] TRUMPF LASER GMBH: VisionLine. Betriebsanleitung. Schramberg, 2016
- [251] GÜNTHER, J.: Machine intelligence for adaptable closed loop and open loop production engineering systems. Dissertation, Technische Universität München. München, 2018
- [252] SITA MESSTECHNIK GMBH: SITA CleanoSpector. Berührungslose Sauberkeitskontrolle von Teileoberflächen auf filmischen Restschmutz durch Fluoreszenzmessung. Produktdatenblatt. Dresden, 2013
- [253] TRUMPF LASER GMBH: Programmierbare Fokussieroptiken. Technische Daten. Schramberg, 2019
- [254] TRUMPF LASER GMBH: *TruDisk. Technische Daten.* Schramberg, 2016
- [255] KEITHLEY INSTRUMENTS INC.: 6220 6221. AC and DC Current Source. Produktdatenblatt [online]. Verfügbar unter: https://de.tek.com/datasheet/model-6220-dc-current-sourceand-model-6221-ac-and-dc-current-source. Überprüfungsdatum: 13. September 2019
- [256] KEITHLEY INSTRUMENTS INC.: 2182A. Nanovoltmeter. Produktdatenblatt [online]. Verfügbar unter: https://de.tek.com/data sheet/nanovoltmeter-model-2182a. Überprüfungsdatum: 13. September 2019

- [257] OMEGA ENGINEERING GMBH: SA2C-RTD, SA2F-RTD. Selbstklebende, flexible Pt100-Fühler für Oberflächenmessungen. Produktdatenblatt, Revision 06.2009. Deckenpfronn, 2009
- [258] OMEGA ENGINEERING GMBH: TXDIN1600T. DIN-Schienen Transmitter mit 3-fach galvanischer Trennung für Temperatur und Widerstand. Produktdatenblatt, Revision 05.2011. Deckenpfronn, 2011
- [259] OMEGA ENGINEERING GMBH: *Werkskalibrierzertifikat*. Kalibrierschein-Nr. CAL17/0530/SG1. Deckenpfronn, 2017
- [260] VOGL, G.: Umweltsimulation für Produkte. Zuverlässigkeit steigern, Qualität sichern. Würzburg: Vogel Buchverlag, 1999. Vogel-Fachbuch
- [261] BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRT-SCHAFT: *Strompreis für die Industrie [online]*. Verfügbar unter: https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/strompreisfuer-die-industrie/. Überprüfungsdatum: 23. Oktober 2019
- [262] BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN: *AfA-Tabellen. AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Maschinenbau"*. Verfügbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Stan dardartikel/Themen/Steuern/Weitere\_Steuerthemen/Betriebs pruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle\_Maschinenbau.html. Über-prüfungsdatum: 8. November 2019

## Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] GLAESSEL, T.; SEEFRIED, J. und FRANKE, J.: Challenges in the Manufacturing of Hairpin Windings and Application Opportunities of Infrared Lasers for the Contacting Process. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 7<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2017, S. 64-70
- [P2] RIEDEL, A.; MASUCH, M.; WEIGELT, M.; GLÄßEL, T.; KÜHL, A.; REINSTEIN, S. und FRANKE, J.: *Challenges of the Hairpin Technology for Production Techniques*. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 21<sup>st</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2018, S. 2471-2476
- [P3] WEIGELT, M.; RIEDEL, A.; MASUCH, M.; MAHR, A.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Potentials of an Explicit Finite Element Analysis of the Bending Processes for Coated Copper Wires. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 7<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2017, S. 71-75
- [P4] GLAESSEL, T.; BACHINSKI PINHAL, D.; MASUCH, M.; GERLING, D. und FRANKE, J.: *Manufacturing Influences on the Motor Performance of Traction Drives with Hairpin Winding*. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 9<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2019, S. 61-68
- [P5] SPRENG, S.; RISCH, F.; GLÄßEL, T.; WOLFF, J. und FRANKE, J.: Evaluation of Energy Efficient Joining Processes in the Field of Electric Drives Manufacturing Considering Quality Aspects. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 4<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2014, S. 114-119
- [P6] SPRENG, S.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Adaption of the Ultrasonic Welding Technique to the Process of Joining Insulated Copper Wires with Standardized Tubular Cable Lugs. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 61<sup>st</sup> Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). 2015, S. 147-153
- [P7] SPRENG, S.; GLÄßEL, T.; HOETZEL, S.; SCHAEFER, H.; WUNDER, D. und FRANKE, J.: Evaluation of the Influence of Varying Electrode Materials Within the Thermo-Crimping Process. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 5<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2015, S. 18-23

- [P8] SPRENG, S.; GLAESSEL, T.; MUSELMANN, J.; WÖRRLEIN, M. und FRANKE, J.: Quantification of the Influence of Varying Electrode Shapes and Materials on the Thermo-Crimping Process of Standardized Tubular Cable Lugs. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 6<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2016, S. 48-51
- [P9] SEEFRIED, J.; GLÄßEL, T.; ZÜRN, M. und FRANKE, J.: Evaluation of Monitoring Approaches for the Ultrasonic Crimping Process of Tubular Cable Lugs. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 7<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2017, S. 212-217
- [P10] FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRN-BERG: Kontaktierverfahren für lackisolierte Leiter. Erfinder: GLÄßEL, T.; SPRENG, S. und FRANKE, J. Internationale Patentschrift, Veröffentlichungsnr. WO2018/219802A1. 06. Dezember 2018
- [P11] SPRENG, S.; BORNGRAEBER, T.; GLAESSEL, T. und FRANKE, J.: Qualification of main impacts on the inductive skinning process of copper wire bundles. In: SWINGLER J. (Hrsg.): Proceedings of 28<sup>th</sup> International Conference on Electric Contacts (ICEC). 2016, S. 191-195
- [P12] GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Kontaktierung von Antrieben für die Elektromobilität. Innovative Vorgehensweisen, Prozessketten und Technologien. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2017, 112(5), S. 322-326. ISSN 0947-0085
- [P13] GLAESSEL, T.; SEEFRIED, J.; MASUCH, M.; RIEDEL, A.; MAYR, A.; KUEHL; A. und FRANKE, J.: Process Reliable Laser Welding of Hairpin Windings for Automotive Traction Drives. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI): Tokyo. 2019
- [P14] GLAESSEL, T.; SEEFRIED, J.; KUEHL, A. und FRANKE, J.: Skinning of Insulated Copper Wires within the Production Chain of Hairpin Windings for Electric Traction Drives. In: International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research [online], 2020, 9(2). ISSN 2278-0149

- [P15] GLÄßEL, T.; MASUCH, M.; WEIGELT, M.; KÜHL, A. und FRANKE, J.: Schlussbericht zu dem Teilvorhaben "Automatisierte Fertigungstechnologien zum Biegen, Montieren und Schalten von innovativen Formspulenwicklungen" im Verbundprojekt "PRO-E-Traktion". Abschlussbericht [online], 2020. Verfügbar unter: https://zenodo.org/record/3691997Xx2ZffZuKUk. Überprüfungsdatum: 26. Juli 2020
- [P16] GLAESSEL, T.; BAAT, F.; SCHWINGHAMMER, D.; SEEFRIED, J.; KUEHL, A. und FRANKE, J.: Infrared laser based contacting of barwound windings in the field of electric drives production. In: SCHMIDT, M.; VOLLERTSEN, F.; DEARDEN, G. (Hrsg.): Procedia CIRP, Volume 74: Proceedings of 10<sup>th</sup> CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE). Amsterdam: Elsevier. 2018, S. 17-22
- [P17] MAYR, A.; LUTZ, B.; WEIGELT, M.; GLÄßEL, T.; KIßKALT, D.; MASUCH, M.; RIEDEL, A. und FRANKE, J.: Evaluation of Machine Learning for Quality Monitoring of Laser Welding Using the Example of the Contacting of Hairpin Windings. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of 8<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2018, S. 177-183

## Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten\*

- [S1] STREEB, C.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Klassifizierung von Kontaktstellen in Abhängigkeit des Wicklungsaufbaus und Bewertung von Abhängigkeiten für Kontaktierungstechnologien. Projektarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2018
- [S2] VENZL, P.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Analyse von Einflüssen des Wicklungsaufbaus auf Kontaktierungstechnologien. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2018
- [S3] DÖRR, M.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Ableitung von wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen dem Laserschweiß-und Abtragungsergebnis bei Hairpinwicklungen. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2019
- [S4] SEMM, W.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Simulative Durchführung von Parameterstudien zum Laserstrahlschweißen halboffener Formspulen und Validierung der Ergebnisse. Projektarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2018
- [S5] SERDAR, G.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Evaluierung von Wechselwirkungen im Prozess des Laserstrahlschweißens von Hairpinwicklungen. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2019
- [S6] SCHWINGHAMMER, D.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Evaluierung von Wechselwirkungen im Prozess des Laserstrahlschweißens von Hairpinwicklungen. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2018
- [S7] DOTTERWEICH, J.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Implementierung einer automatisierten Widerstandsmessung und Validierung in Laserschweißversuchen an Flachdrahtwicklungen. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2018
- [S8] FRELLER, A.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Untersuchung des Einflusses der Strahlführungsstrategie auf das Laserstrahlschweißen von Hairpinwicklungen. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2019

- [S9] BÖCK, B.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Optimierung der laserbasierten Kontaktierung von Formspulenwicklungen in Parameterstudien. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2019
- [S10] BAAT, F.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Entwicklung eines Prozesses zum Laserstrahlschweißen von Hairpinwicklungen mittels Leistungsmodulation. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2018
- [S11] VURAL, A.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Technologischer Vergleich von Fügetechnologien zur Kontaktierung von Hairpinwicklungen. Projektarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2019
- [S12] NEUMEIER, I.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Parameterstudie zum Laserstrahlschweißen variierender Drahtgeometrien für die Herstellung von Hairpinwicklungen. Bachelorarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2019
- [S13] GUCK, R.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Evaluierung von Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Hairpinwicklungen mit vorgelagerten Trennprozessen. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2019
- [S14] COLLISCHON, F.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Experimentelle Evaluierung von Abhängigkeiten der laserbasierten Kontaktierung elektrischer Antriebe vom Oxidationszustand. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2019
- [S15] ROTH, P.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: *Konzeption einer Vorrichtung zum Laserschweißen von Hairpins*. Projektarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2017
- [S16] KLEBER, M.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Konzeption, Ausarbeitung und Realisierung einer Prüfvorrichtung zur Quantifizierung des elektrischen Widerstands von Kontaktstellen bei Hairpinwicklungen. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2017

[S17] DESSELBERGER, J.; GLÄßEL, T. und FRANKE, J.: Konzeption, Umsetzung und Validierung einer Vorrichtung zum reproduzierbaren Trennen von Flachleitern für Hairpins. Masterarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Erlangen, 2017

<sup>\*</sup> Der Autor an zweiter Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

# Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020): Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308 FAU Studien aus dem Maschinenbau ISSN 2625-9974 FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting Projektierung von Montagesystemen FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989. ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989. ISBN 3-446-15783-2. Band 7: Wolfgang Scholz Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989. ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990. ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16112-0. Band 13: Frank Vollertsen Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO2-Hochleistungslasern LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991. ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991. ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16454-5. Band 19: Arnold vom Ende Untersuchungen zum Biegeumforme mit elastischer Matrize LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991. ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991. ISBN 3-446-16593-2. Band 25: Christoph Thim Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller CO2 -Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992. ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4. Band 31: Hubert Reinisch Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1. Band 37: Stephanie Abels Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1. Band 43: Werner Heckel Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf Zielkostenorientierte Montageplanung FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0. Band 49: Wolfgang Greska Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996. ISBN 3-87525-075-3. Band 55: Henning Hanebuth Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-082-6. Band 61: Andreas Brand Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID) FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung FAPS, 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 FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus Laserstrahlumformen von Profilen LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer Adaptive Strahlführungen für CO2-Laseranlagen LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997. ISBN 3-87525-097-4. Band 73: Volker Franke Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998. ISBN 3-87525-103-2. Band 79: Elke Rauh Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO2-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 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 FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1. Band 85: Ralf Luchs Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 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 LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999. ISBN 3-87525-119-9. Band 91: Horst Arnet Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO2-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans Laserstrahlsintern von Metallpulver -Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-128-8. Band 97: Gunter Beitinger Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999. ISBN 3-87525-129-6.

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

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

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

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

Band 102: Christian Hinsel Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000. ISBN 3-87525-138-5. Band 103: Stefan Bobbert Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

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

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

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

Band 107: Thomas Stöckel Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1. Band 108: Frank Pitter Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

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

Band 110: Burkhard Müller Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0. Band 114: Alexander Huber Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0. Band 120: Nicolas Tiesler Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, o Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9. Band 126: Stefan Kaufmann Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch 3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002. ISBN 3-87525-174-1. Band 132: Matthias Negendanck Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002. 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

LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-185-7. Band 138: Andreas Licha Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003. ISBN 3-87525-196-2. Band 144: Andreas Kach Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, o Tab. 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 LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004. ISBN 3-87525-206-3. Band 150: Martino Celeghini Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005. ISBN 3-87525-218-7. Band 156: Frank Niebling Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.

ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005. ISBN 3-87525-224-1. Band 162: Peter K. Kraus Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, o Tab. 2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou

Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005. ISBN 3-87525-232-2. Band 168: Werner Enser Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, o Tab. 2006. ISBN 3-87525-240-3. Band 174: Alexander Hofmann Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4. Band 180: Yong Zhuo Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere LFT, 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 FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6. Band 185: Klaus Lamprecht Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2. Band 190: Joachim Hecht Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

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

Band 192: Massimo Tolazzi Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5 LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1. Band 196: Wolfgang Hußnätter Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-280-4.

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

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

Band 200: Jürgen Lechler Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 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 LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3. Band 202: Andreas Schaller Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, o Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.

ISBN 978-3-87525-290-3.

#### Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

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

Band 206: Steffen Polster Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-295-8. Band 208: Uwe Vogt Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

### Band 209: Till Laumann Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 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 LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 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 LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5. Band 219: Andreas Dobroschke Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 215: Christian Matzner Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-310-8. Band 220: Azhar Zam Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

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

Band 217: Massimo Cojutti Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3. Band 222: Thomas Rechtenwald Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 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 FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-324-5.

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

Band 225: Martin Brandhuber Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 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 LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 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 LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7. Band 229: Alexander Grimm Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

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

Band 231: Thomas Kroiß Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Brücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9. Band 234: Florian Albert Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 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 LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-357-3. Band 244: Christian Neudel Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-358-0. Band 249: Paul Hippchen Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 245: Anja Neumann Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014. 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

FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-363-4. Band 250: Martin Zubeil Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-369-6. Band 254: Markus Weigl Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation FAPS, 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 LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-375-7. Band 259: Felix Lütteke Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren

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

Band 260: Martin Grüner Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-384-9. Band 264: Matthias Domke Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 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 LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 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 LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

#### Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-396-2. Band 274: Michael Lechner Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 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 LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 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 FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-402-0. Band 279: Fabian Zöller Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexibelen Fabrik FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-407-5.
Band 284: Stefan Berger Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-412-9. Band 289: Thomas Senner Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, o Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrimanidis Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-419-8. Band 294: Ioannis Tsoupis Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung – Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-425-9. Band 299: Mario Lušić Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, o Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der höherfesten Aluminiumlegierung EN AW-7020 LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-430-3. Band 304: Bassim Bachy Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS) FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1. Band 309: Martin Müller

Untersuchung des kombinierten Trennund Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinchverfahren

LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

## Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

## Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

#### Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

#### Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

#### Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

#### Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

#### Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

#### Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

# Band 325: Stefan Lutz Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Modellbasierte Prozesskettenabbildung

rührreibgeschweißter Aluminium-

halbzeuge zur umformtechnischen

Herstellung höchstfester Leichtbau-

2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.

Band 326: Tobias Gnibl

strukturteile

Band 330: Stephan Rapp Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.

Band 331: Michael Scholz Intralogistics Execution System mit

2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner

text der Digitalisierung

2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 327: Johannes Bürner Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1. Band 333: Daniel Benjamin Krüger Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.

Strategien der Produktindividualisierung

in der produzierenden Industrie im Kon-

FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.

Band 334: Thomas Kuhn Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID) FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-252-9. Band 335: Hans Fleischmann Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.

2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimpprozesses FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-293-2. Band 341: Patrik Schwingenschlögl Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti Evaluation of failure behaviour of sheet metals LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umformund Abschreckprozess LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-316-8. Band 347: Philipp Amend Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21

Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4

Band 350: Florian Pilz Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8

Band 351: Sebastian Josef Katona Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle

KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6

Band 352: Jürgen Herrmann Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1 Band 353: Christof Küstner Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9

Band 354: Tobias Gläßel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

# Abstract

Driven by the electrification of the automotive power train, electrical machines are developing rapidly. In this context, especially the winding is optimized, focusing bar-wound windings with rectangular cross sections. This approach replaces complicated winding processes by bending, assembling and joining technologies, that can be controlled easier. Derived from this, advantages in series production can be quoted as well as product-related benefits like an enhancement of the copper fill ratio. Manufacturing of the high number of contacts poses a substantial challenge for the application of bar-wound windings, as they have to comply with extensive mechanical and electrical requirements.

In this dissertation an analysis comes to the result, that laser technologies show considerable potentials for the contacting of barwound windings with rectangular cross-sections. For this reason, the removal of the insulation from copper conductors by means of different laser technologies is examined. Powerful infrared lasers are applied to realize the joining task and interdependencies between process variables, workpiece properties and the quality of the contact produced are investigated. Based on the findings, a generic manufacturing chain for opened bar-wound windings is analyzed and the impact of dependencies overarching the process chain is quantified with a systematics. The dissertation closes with a concept, showing how the findings of this work can be used to realize a stable contacting process in the context of the production chain for bar-wound windings. Angetrieben durch die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs durchlaufen elektrische Maschinen eine rasante Entwicklung. Vor diesem Hintergrund erfolgt insbesondere die Optimierung der Wicklung, wobei die Formspulentechnologie in Kombination mit rechteckigen Leiterquerschnitten in den Fokus rückt. Diese ersetzt komplexe Wickelprozesse durch deterministische Umform-, Montage- und Fügeverfahren, woraus sich Vorteile in der Serienproduktion ableiten lassen. Zusätzlich werden produktseitige Optimierungen, wie z.B. die Erhöhung des mechanischen Kupferfüllfaktors, ermöglicht. Eine wesentliche Problemstellung beim Einsatz von Formspulenwicklungen liegt darin, dass bei der Herstellung eine große Anzahl an Kontaktstellen zu realisieren ist. An diese werden herausfordernde mechanische und elektrische Anforderungen gestellt.

Eine im Rahmen dieser Dissertation durchgeführte Analyse kommt zu dem Ergebnis, dass Lasertechnologien die größten Potenziale zur Kontaktierung von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen zeigen. Daher wird eine Untersuchung des Abtrags der Lackisolation von Kupferleitern unter Berücksichtigung verschiedener Lasertechnologien durchgeführt. Zur Realisierung der Fügeaufgabe werden leistungsstarke infrarote Laser eingesetzt und es erfolgt eine umfassende Ermittlung der Wirkbeziehungen zwischen Prozessgrößen, Werkstückeigenschaften sowie der erzielbaren Kontaktstellenqualität.

Auf Grundlage der Erkenntnisse wird eine exemplarische Herstellungskette für offene Formspulenwicklungen analysiert und mit einer Systematik quantifiziert, wie sich prozesskettenübergreifende Abhängigkeiten auf den Kontaktierungsprozess auswirken. Die Ausarbeitung schließt mit einem Konzept, das die Nutzung der ermittelten Zusammenhänge zur Umsetzung eines stabilen Kontaktierungsprozesses im Kontext der Prozesskette zur Herstellung von Formspulenwicklungen vorstellt.

