



304

Philipp Alexander Schmidt
Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von
Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen

Philipp Alexander Schmidt

**Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte
von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und
Hybridfahrzeugen**

Herbert Utz Verlag · München 2015

Forschungsberichte IWB
Band 304

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7166-3 Version: 1 vom 06.10.2015
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4519-0
Copyright© Herbert Utz Verlag 2015

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen

Philipp Alexander Schmidt

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen

Die Dissertation wurde am 31.03.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.07.2015 angenommen.

Philipp Alexander Schmidt

**Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte
von Lithium-Ionen-Batterien
in Elektro- und Hybridfahrzeugen**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 304

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

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.

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4519-0

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

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

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

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

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

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

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

Ich möchte an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh (Leiter des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik) für die Möglichkeit der Promotion und die Betreuung meiner Arbeit danken. Mein Dank gilt auch meinem Zweitprüfer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen (Leiter des Lehrstuhls für Elektrische Energiespeichertechnik der Technischen Universität München) sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp (Leiter des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München) für die Übernahme des Vorsitzes.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Dr.-Ing. Robert Wiedenmann und Markus Schweizer, die mit ihren kritischen und hilfreichen Anmerkungen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Experten-Kollegen Manuel Keßler und Johannes Schmalz für die zahlreichen spaßigen Forschungsabende in unserem Büro.

Ein weiteres Dankeschön geht an Thomas Pauleser, Matthias Moll und Dr.-Ing. Daniel Schmid der Audi AG, die mir zu meiner Zeit als INI.TUM-Doktorand alle Möglichkeiten geboten haben, um neue Forschungsansätze zu entwickeln und umzusetzen.

Mein größter Dank gilt jedoch meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung das Promovieren leicht gemacht haben – mein Vater unterstützte mich mit organisatorischen Ratschlägen, meine Mutter brachte mich durch ihr Geschick, ein komplexes Thema verständlich zu strukturieren, voran.

München, im Juli 2015

Philipp Schmidt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Vorgehensweise	2
2 Grundlagen	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Batteriesysteme für Elektro- und Hybridfahrzeuge	5
2.2.1 Allgemeines	5
2.2.2 Aufbau von Batteriesystemen	6
2.2.3 Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie	6
2.2.4 Elektrische Kontaktierung eines Batteriemoduls	10
2.2.5 Anforderungen an die elektrische Kontaktierung	12
2.3 Lasermaterialbearbeitung	14
2.3.1 Allgemeines	14
2.3.2 Laserstrahleigenschaften und Prozessgrößen	15
2.3.3 Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück	17
2.3.4 Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen	19
2.3.5 Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoffen	20
2.3.6 Laserstrahlschweißen von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen	22

2.3.7 Vor- und Nachteile bei der elektrischen Kontaktierung mittels Laserstrahlschweißen	24
2.4 Elektrischer Widerstand von Kontakten	26
2.4.1 Allgemeines	26
2.4.2 Kraftschlüssige Kontakte	26
2.4.3 Stoffschlüssige Kontakte	29
2.4.4 Vier-Leiter-Widerstandsmessung	30
2.5 Optimierung mittels evolutionärer Algorithmen	32
2.5.1 Evolutionäre Algorithmen	32
2.5.2 Genetischer Algorithmus	32
2.6 Zusammenfassung	36
3 Stand der Wissenschaft und Technik	37
3.1 Allgemeines	37
3.2 Artgleiches Laserstrahlschweißen von Aluminium und Kupfer	38
3.2.1 Laserstrahlschweißen von Aluminium	38
3.2.2 Laserstrahlschweißen von Kupfer	38
3.3 Laserstrahlschweißen der Aluminium-Kupfer-Mischverbindung	39
3.3.1 Laserstrahlschweißen von Aluminium mit Kupfer	39
3.3.2 Methoden zur Vermeidung intermetallischer Phasen	41
3.4 Elektrische Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen	43
3.4.1 Überblick relevanter Fügeverfahren	43
3.4.2 Laserstrahlschweißen	46
3.5 Zusammenfassung und Handlungsbedarf	51

4 Beschreibung der Versuchsaufbauten	53
4.1 Allgemeines	53
4.2 Versuchsaufbau zum Laserstrahlschweißen	53
4.2.1 Schweißversuche	53
4.2.2 Lasersystemtechnik	54
4.2.3 Werkstoffe	56
4.3 Messung des elektrischen Widerstands	56
4.3.1 Vier-Leiter-Widerstandsmessung	57
4.3.2 Definition der Kontaktgütemaßzahl	58
4.3.3 Prüfstand und Messtechnik	59
4.3.4 Berechnung von Messabweichungen	60
4.4 Zusammenfassung	62
5 Eigenschaften laserstrahlgeschweißter Kontakte	65
5.1 Allgemeines	65
5.2 Kontaktgütemaßzahl laserstrahlgeschweißter Verbindungen	66
5.2.1 Einfluss der Schweißnahtgeometrie auf die Kontaktgütemaßzahl	66
5.2.2 Einfluss der Schweißnahtanordnung auf die Kontaktgütemaßzahl	71
5.2.3 Experimentelle Validierung	72
5.3 Thermische Belastung der Kontaktstelle	74
5.3.1 Allgemeines	74
5.3.2 Temperaturänderung in Abhängigkeit von der Anbindungsfläche	75
5.3.3 Ansätze zur Reduzierung der thermischen Belastung	78
5.4 Zusammenfassung	79

6 Methode zur simulationsgestützten Auslegung elektrischer Kontakte	83
6.1 Allgemeines	83
6.2 Beschreibung der Optimierungsmethode	84
6.2.1 Optimierungsaufgabe	84
6.2.2 Lösung der Optimierungsaufgabe	85
6.2.3 Charakteristik des genetischen Algorithmus	87
6.3 Optimierung der elektrischen Eigenschaften	93
6.3.1 Definition der Zielfunktion	93
6.3.2 Thermoelektrische Modellbildung	94
6.3.3 Verifikation	97
6.4 Optimierung der mechanischen Eigenschaften	100
6.4.1 Definition der Zielfunktion	100
6.4.2 Elastomechanische Modellbildung	102
6.4.3 Verifikation	104
6.5 Multikriterielle Optimierung	106
6.5.1 Definition der Zielfunktion	106
6.6 Zusammenfassung	107
7 Elektrische Kontaktierung eines Batteriemoduls	109
7.1 Allgemeines	109
7.2 Modulaufbau	109
7.3 Fügen des Aluminium-Kupfer-Hybridelements	111
7.3.1 Auswahl geeigneter Fügeverfahren	111

7.3.2	Ermittlung der Kontaktgütemaßzahl und der Verbindungsfestigkeit	112
7.3.3	Fazit und Auswahl einer Fügetechnologie	115
7.4	Laserstrahlschweißen von Zellpol und Zellverbinder	116
7.4.1	Ermittlung der maximalen Anbindungsfläche	116
7.4.2	Simulationsgestützte Optimierung der Schweißnahtgeometrie	119
7.5	Batteriemodul mit optimierter Schweißnahtgeometrie	127
7.5.1	Allgemeines	127
7.5.2	Technologische Bewertung	128
7.5.3	Wirtschaftliche Bewertung	129
7.6	Zusammenfassung	131
8	Schlussbetrachtung	133
8.1	Zusammenfassung	133
8.2	Ausblick	134
9	Literaturverzeichnis	135
10	Studienarbeiten	149
11	Anhang	151
A1	Fertigungsparameter der Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen	151
A2	Kenngößen der gepulsten Strahlquelle	152
A3	Batteriemodul mit geschraubter Kontaktierung	153
A4	Daten zur wirtschaftlichen Bewertung	153

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Al	Element Aluminium
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Co	Element Kobalt
Cu	Element Kupfer
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EMPT	Elektromagnetische Pulstechnologie
F	Element Fluor
FEM	Finite-Elemente-Methode
GA	Genetischer Algorithmus
GEH	Gestaltänderungsenergiehypothese
HV	high voltage (<i>deutsch: Hochspannung</i>)
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TUM
KGS	Kaltgasspritzen
Li	Element Lithium
LSS	Laserstrahlschweißen
Mn	Element Mangan
Nd:YAG	Neodym-dotiert: Yttrium-Aluminium-Granat
Ni	Element Nickel
O	Element Sauerstoff
P	Element Phosphor
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
TUM	Technische Universität München
USW	Ultraschallschweißen
Yb:YAG	Ytterbium-dotiert: Yttrium-Aluminium-Granat

Variable	Einheit	Bedeutung
a	mm	Abstand zwischen den Schweißpunkten
A	-	Bezeichnung des Fügepartners A
A	mm ²	stromtragender Querschnitt
\vec{A}	mm ²	gerichtete Fläche des stromtragenden Querschnitts
A_J	A/mm ²	Eingangsstromdichte
A_L	mm ²	Leiterquerschnitt
A_N	-	numerische Apertur der Scanneroptik
A_S	mm ²	Anbindungsfläche der Schweißnaht
A_s	mm ²	scheinbare Kontaktfläche
A_t	mm ²	tragende Kontaktfläche
A_w	mm ²	wirksame Kontaktfläche
a_x	mm	Abstand der parallel angeordneten Schweißnähte
a_y	mm	Abstand der Punkte und Steppnähte
b	mm	Probenbreite
B	-	Bezeichnung des Fügepartners B
b_s	mm	Schweißnahtbreite
$b_{s,OSZ}$	mm	Schweißnahtbreite bei überlagerter Strahloszillation
c_p	J/(kg·K)	spezifische Wärmekapazität
d_f	μm	Fokusbereich im Fokuspunkt
d_L	μm	Fokusbereich
$d_{L,WL}$	μm	Durchmesser des Lichtwellenleiters
E	GPa	Elastizitätsmodul
\vec{E}	V·m ⁻¹	elektrische Feldstärke
f_f	mm	Brennweite der Scanneroptik
f	Hz	Frequenz der Strahloszillation

Variable	Einheit	Bedeutung
F_{max}	N	Maximale Zug- /Scherzugkraft
f_R	-	Maximale relative Messabweichung
f_s	Hz	Abtastrate bei der Widerstandsmessung
F_x	N	Kraft in x-Richtung
I	A	elektrischer Strom
i	-	Laufvariable der Schweißpunkte
I_0	A	Prüfstrom
I_L	W/mm ²	Laserstrahlintensität
I_M	A	Prüfstrom in den Messleitungen
j	-	Laufvariable der Individuen des GA
\vec{J}	A/mm ²	Stromdichte
k	-	Laufvariable der Generationen des GA
k_u	-	Kontaktgütemaßzahl
l	mm	Länge des Kontaktelements
l_m	mm	minimale Elementkantenlänge
l_s	mm	Schweißnahtlänge
l_{Stepp}	mm	Länge der Steppnaht
l_x	mm	Messstrecke
l_{ii}	mm	Überlapplänge
M^2	-	Beugungsmaßzahl
$n_E; n_R; n_M$	-	Anzahl für den Elitismus, die Rekombination und die Mutation der ausgewählten Individuen
n_i	-	Anzahl an Individuen einer Population
n_k	-	Anzahl der Knoten innerhalb des Suchbereichs
n_P	-	Populationsgröße
n_{Punkte}	-	Anzahl der Schweißpunkte