

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

**Elektrische Verbindung von zylindrischen  
Lithium-Ionen-Zellen zur Herstellung  
von Energiespeichersystemen**

**Patrick Schmitz**

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: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation:

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

Die Dissertation wurde am 01.02.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.05.2019 angenommen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Allgemeine Zielsetzung und Vorgehensweise	2
1.3 Inhaltlicher Aufbau der Arbeit	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Allgemeines	5
2.2 Elektrische Energiespeicher	5
2.2.1 Allgemeines	5
2.2.2 Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle	6
2.2.3 Aufbau von elektrischen Energiespeichern	9
2.2.4 Anforderungen an die elektrische Verbindung eines Zellverbunds	11
2.2.5 Anforderungen an die elektrische Kontaktierung von zylindrischen Zellen	14
2.3 Lasermaterialbearbeitung	17
2.3.1 Allgemeines	17
2.3.2 Laserstrahlführung und Prozessgrößen	17
2.3.3 Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück	19
2.3.4 Eigenschaften gepulster Laserstrahlung	21
2.4 Optimierung mittels evolutionärer Algorithmen	24
2.4.1 Allgemeines	24
2.4.2 Genetische Algorithmen	25
2.5 Zusammenfassung	30
<b>3 Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>33</b>
3.1 Allgemeines	33

3.2	Elektrische Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen	34
3.2.1	Relevante Fügeverfahren	34
3.2.2	Kontaktierung mittels Laserstrahlung	40
3.2.3	Schweißen mittels gepulster Laserstrahlung	44
3.3	Optimierung der Zellkontaktierung	49
3.4	Topologieoptimierung	51
3.5	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	53
<b>4</b>	<b>Versuchsumgebung</b>	<b>55</b>
4.1	Allgemeines	55
4.2	Lasersystemtechnik	55
4.3	Versuchsaufbau	56
4.3.1	Schweißversuche	56
4.3.2	Thermische Analyse	57
4.3.3	Kontaktierung eines Zellverbunds	58
4.4	Werkstoffe	58
4.5	Auswertemethodik	59
4.5.1	Messung des elektrischen Widerstands	59
4.5.2	Messung der Scherzugfestigkeit	60
4.5.3	Messung der Vibrationsbeständigkeit	60
4.5.4	Messung der Zellkapazität	61
4.6	Zusammenfassung	61
<b>5</b>	<b>Auslegung des gepulsten Laserstrahlschweißprozesses für die Zellkontaktierung</b>	<b>63</b>
5.1	Allgemeines	63
5.2	Prozessstrategien für das gepulste Laserstrahlschweißen	64
5.3	Prozessuntersuchungen zum Schweißen mittels Spike-Puls	71
5.4	Elektrische und mechanische Auslegung der Anbindungsfläche	76
5.4.1	Vorgehensweise	76

5.4.2	Geometrische Anordnung der Schweißpunkte	76
5.4.3	Elektrischer Widerstand	80
5.4.4	Mechanische Zugfestigkeit	81
5.4.5	Vibrationsbeständigkeit	83
5.4.6	Kombinierte Betrachtung	85
5.5	Zusammenfassung	86
<b>6</b>	<b>Einfluss der Kontaktierung auf die Zelleigenschaften</b>	<b>89</b>
6.1	Allgemeines	89
6.2	Evaluierung der thermischen Belastung	90
6.3	Einfluss der Prozesswärme auf die Zellkapazität	92
6.4	Zusammenfassung	96
<b>7</b>	<b>Methode zur simulationsgestützten Auslegung des Zellverbinders</b>	<b>99</b>
7.1	Allgemeines	99
7.2	Optimierungsaufgabe und Lösungsansatz	100
7.2.1	Beschreibung der Optimierungsmethode	100
7.2.2	Elektrische Modellbildung	102
7.2.3	Charakteristik des Genetischen Algorithmus	105
7.3	Multikriterielle Optimierung des Zellverbinders	109
7.3.1	Grundlegende Optimierung	109
7.3.2	Feinoptimierung	113
7.3.3	Ergebnis der Optimierung	115
7.4	Verifizierung	117
7.5	Zusammenfassung	119
<b>8</b>	<b>Elektrische Kontaktierung eines Zellverbunds</b>	<b>121</b>
8.1	Allgemeines	121
8.2	Auslegung des Zellverbinders	121
8.2.1	Grundlegende Optimierung	123
8.2.2	Feinoptimierung	125

8.2.3	Ergebnis der Optimierung	127
8.3	Laserstrahlschweißen des Zellverbunds	128
8.4	Technologische Bewertung	129
8.5	Wirtschaftliche Bewertung	131
8.6	Zusammenfassung	133
<b>9</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>135</b>
9.1	Zusammenfassung	135
9.2	Ausblick	136
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>
<b>11</b>	<b>Verzeichnis betreuter Studienarbeiten</b>	<b>149</b>
<b>12</b>	<b>Anhang</b>	<b>151</b>
A1	Schliffbilder der Voruntersuchungen	151
A2	Vollständiger Versuchsplan der Prozessuntersuchungen	151
A3	Mikroskopieaufnahmen zur Bewertung der Reproduzierbarkeit	152
A4	Schweißvorgang der Widerstandspunktschweißungen	156
A5	Vernetzung des Simulationsmodells	156
A6	Daten zur wirtschaftlichen Bewertung	157

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Al	chemisches Element Aluminium
BMS	Batterie-Management-System
CC-CV	constant current - constant voltage ( <i>dt.: konstanter Strom - konstante Spannung</i> )
CO <sub>2</sub> -Laser	Kohlenstoffdioxidlaser
Cu	chemisches Element Kupfer
CuSn6	Bronze
CuZn37	Messing
cw	continuous wave ( <i>dt.: kontinuierlich emittierende Strahlung</i> )
DoE	Design of Experiments ( <i>dt.: statistische Versuchsplanung</i> )
FE	Finite-Elemente (z. B.: FE-Simulation)
<i>iw</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München
LFP, LiFePO <sub>4</sub>	Lithium-Eisenphosphat
Li	chemisches Element Lithium
Li <sup>+</sup>	Lithium-Ionen
LIMBO	Laser Impulse Metal Bonding ( <i>dt.: Laserimpuls-Metallbonden</i> )
LiMH	Nickel-Metallhydrid
SHADOW	Stepless High Speed Accurate and Discrete One Pulse Welding ( <i>dt. stufenloses, schnelles, präzises und diskretes Einpuls-Schweißen</i> )
TUM	Technische Universität München
WPS	Widerstandspunktschweißen
Yb:YAG	Ytterbium-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall
ZAE	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung



## Formelzeichenverzeichnis

Variable	Einheit	Bedeutung
$a_{AF}$	mm	Abstand von Zellachse und Aufhängung bei der Vibrationsprüfung
$A_G$	-	Absorptionsgrad
$A_S$	mm <sup>2</sup>	Anbindungsfläche der Schweißnaht
$A_Z$	mm <sup>2</sup>	Fläche des Zellverbinders
$d(z)$	µm	Strahldurchmesser im Abstand $z$ vom Fokus
$d_f$	µm	Strahldurchmesser im Fokusabstand
$d_{LLK}$	µm	Durchmesser der Faser des Lichtleitkabels
$d_P$	mm	Durchmesser der Kreisgeometrie der Schweißpunkte
$d_S$	mm	Einschweißtiefe
$E$	N/m <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
$\vec{E}$	V/m	elektrische Feldstärke
$E_E$	J	emittierte Energie
$E_i$	mJ	Energie des Pulsniveaus $i$ mit $i \in \mathbb{N}$
$E_P$	mJ	Pulsenergie
$f_f$	mm	Brennweite
$F_{max}$	N	maximale Scherzugfestigkeit
$F_{min}$	N	minimal notwendige Festigkeit der Kontaktierung
$f_i$	-	Einzelzielfunktionen mit $i \in \{1, 2, 3\}$
$f_{Rep}$	Hz	Repetitionsrate der Laserstrahlung
$F_{Zug}$	N	Zugkraft
$I$	A	Stromstärke
$\vec{J}$	A/m <sup>2</sup>	Stromdichte
$k_u$	-	Kontaktgütemaßzahl
$l_X$	mm	Abstand der Spannungsmessung zur Bestimmung des Widerstands

Variable	Einheit	Bedeutung
$m$	g	Masse
$M^2$	-	Beugungsmaßzahl
$N_E$	-	Anzahl der Individuen
$N_P$	-	Anzahl der Schweißpunkte
$N_{Pop}$	-	Größe der Population
$n_T$	-	Turniergröße
$N_Z$	-	Anzahl der Zyklen
$P$	W	Laserstrahlleistung
$P_i$	W	Leistung des Pulsniveaus $i$ mit $i \in \mathbb{N}$
$P_{L,max}$	W	maximale Laserleistung
$P_{max}$	W	Pulsspitzenleistung
$Q_Z$	Ah	Kapazität der Batteriezelle
$r$	-	maximale Größe des Mutationsschrittes
$R$	$\Omega$	elektrischer Widerstand
$r_A$	mm	Radius der Anschlussstelle
$R_G$	-	Reflexionsgrad
$R_i$	$\mu\Omega$	Widerstand der Verbindungsstelle $i$ mit $i \in \mathbb{N}$
$R_K$	$\mu\Omega$	Widerstand des Zellkontakts
$R_m$	N	Zugfestigkeit
$R_M$	-	Mutationswahrscheinlichkeit
$r_V$	mm	Radius der Verbindungsstelle
$\Delta R$	m $\Omega$	Differenz des elektrischen Widerstands
$R_W$	-	Wiedereinführtrate der neuen Population
$R_X$	m $\Omega$	Gesamtwiderstand der Vier-Punkt-Leiter-Messung
$R_Z$	m $\Omega$	Widerstand des Zellverbinders
$s$	-	Richtung des Mutationsschrittes
$SPP$	mm·mrad	Strahlparameterprodukt

Variable	Einheit	Bedeutung
$\Delta T$	K	Temperaturveränderung
$t$	s	Zeit
$T_G$	-	Transmissionsgrad
$T_{krit}$	°C	maximal zulässige Temperatur der Batteriezelle
$T_M$	°C	Liquidustemperatur
$T_{Rep}$	ms	zeitlicher Pulsabstand
$T_R$	K	Referenztemperatur der Simulation
$U$	V	elektrisches Potenzial / elektrische Spannung
$V$	-	Varianz
$U_i$	V	Spannungswerte der Vier-Punkt-Leiter-Messung mit $i \in \{1, 2\}$
$v_s$	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls auf dem Werkstück
$U_X$	V	Spannungsabfall der Vier-Punkt-Leiter-Messung
$w_1$	-	Gewichtungsfaktor 1 (geringer Widerstand)
$w_2$	-	Gewichtungsfaktor 2 (gleicher Widerstand)
$w_3$	-	Gewichtungsfaktor 3 (geringe Masse)
$w_s$	mm	Anbindungsbreite der Schweißnaht
$z$	mm	Abstand zum Fokus
$Z_F$	-	Zielfunktionswert der Fitness
$z_R$	mm	Rayleighlänge
$\varepsilon_r$	-	relative Permittivität
$\theta$	°	Öffnungswinkel des Laserstrahls
$\lambda$	nm	Wellenlänge der Laserstrahlung
$\lambda_Q$	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
$\mu_r$	-	Permeabilitätszahl
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	m/( $\Omega \cdot \text{mm}^2$ )	elektrische Leitfähigkeit

<b>Variable</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\sigma_R$	$\mu\Omega$	Standardabweichung der Widerstände im Zellverbinder
$\tau_P$	ms	Pulsdauer

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Die Elektromobilität und die erneuerbaren Energien sind zwei zentrale Bausteine der Energiewende. Für diese beiden Technologien werden mobile bzw. stationäre Energiespeicherlösungen benötigt. Der Hochvoltpeicher stellt hierbei für elektrische Fahrzeuge eine der wichtigsten Komponenten dar, da die Faktoren *Kosten* und *Reichweite* maßgeblich durch ihn beeinflusst werden (KAMPKER 2014). Nachhaltige Energiequellen wie Solaranlagen und Windkraftwerke benötigen für einen effizienten Einsatz eine zeitliche und räumliche Entkopplung von Energieerzeugung und Energieverbrauch, weshalb stationäre elektrische Energiespeicher zum Ausgleich der Schwankungen in der Energieversorgung eingesetzt werden müssen (WESSELAK ET AL. 2017, S. 727 ff.).

Lithium-Ionen-Zellen haben sich als Basiskomponente zur elektrochemischen Speicherung von Energie aufgrund einer hohen Energie- und Leistungsdichte, eines hohen Wirkungsgrads sowie einer niedrigen Selbstentladung vor allem im Bereich der mobilen elektrischen Systeme weitestgehend durchgesetzt (REIF 2010, S. 59). Unter den verschiedenen Zellkonzepten werden oft zylindrische Zellen verwendet, da diese aufgrund des gut beherrschten Herstellungsprozesses kostengünstig sind und darüber hinaus ein hohes Maß an Sicherheit bieten (LIENKAMP 2016, S. 12).

Um den geforderten Energieinhalt bzw. die geforderte Leistung und Stromstärke sowie Spannung bereitzustellen, werden viele Batteriezellen zum Aufbau des Energiespeichers seriell und parallel verschaltet (KORTHAUER 2013, S. 299). Je nach System müssen für die Herstellung mehrere tausend Zellen kontaktiert werden. Aufgrund der daraus resultierenden Vielzahl an Kontaktstellen hat die Verbindungstechnik der Zellen einen entscheidenden Einfluss auf die Funktionalität und die Wirtschaftlichkeit des Speichersystems. Bereits geringe Verbesserungen, z. B. im elektrischen Widerstand, führen aufgrund der großen Stückzahl zu wesentlichen Verbesserungen des Gesamtsystems. Für die Kontaktierung von zylindrischen Zellen stellt das Widerstandspunktschweißen (WPS) das konventionelle Verfahren dar. Dieser taktile Prozess wirkt sich insbesondere bei einer hohen Anzahl an Kontakten aufgrund der vielen Positionierungszeiten des Werkzeugs nachteilig auf die Gesamtprozesszeit aus.

### **1.2 Allgemeine Zielsetzung und Vorgehensweise**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist ein geeignetes Verfahren zur Verbindung von zylindrischen Lithium-Ionen-Zellen bereitzustellen. Hierfür müssen zum einen ein Fügeverfahren zur Kontaktierung entwickelt und zum anderen die elektrische Verbindung der parallel geschalteten Zellen betrachtet werden. Für das Fügeverfahren muss aufgrund der kleinen Wandstärke der Zellen ein reproduzierbarer Prozess sichergestellt werden. Den Ausgangspunkt der Untersuchungen stellte das gepulste Laserstrahlschweißen als Lösungsansatz dar. Zunächst wurden verschiedene Prozessstrategien miteinander verglichen und das Spike-Puls-Verfahren für eine ausführliche Prozessuntersuchung ausgewählt. Nachdem ein geeigneter Schweißprozess entwickelt wurde, war das Ziel die Größe der Anbindungsfläche der Kontakte festzulegen. Die Auslegung erfolgte anhand des elektrischen Widerstands, der mechanischen Zugfestigkeit und der Vibrationsbeständigkeit. Bei der Herstellung der Fügeverbindung muss die thermische Belastung der Zelle berücksichtigt werden, weshalb als weiteres Ziel die durch den Schweißprozess induzierte Temperaturveränderung innerhalb der Zelle evaluiert wurde. So konnten geeignete Strategien zur Begrenzung der maximalen Temperatur identifiziert werden. Ein Lösungsbaustein war hierbei die Ermittlung der Auswirkung einer kritischen Temperaturbelastung auf die Zellkapazität. Zur Optimierung der Zellverbindung wurde eine simulationsgestützte Topologieoptimierung aufgebaut. Das Ziel war, eine Parallelschaltung von Zellen zu realisieren, die einen möglichst gleichmäßigen Widerstand aufweist, minimale elektrische Verlustleistungen hervorruft und die Masse des dafür eingesetzten Bauteils gering hält. Abschließend wurden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit validiert, indem ein Demonstrator hergestellt wurde und eine technologische Bewertung der Optimierungsmethode sowie eine wirtschaftliche Betrachtung des Schweißprozesses durchgeführt wurde.

### **1.3 Inhaltlicher Aufbau der Arbeit**

Der Aufbau dieser Arbeit ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Zunächst werden innerhalb der Kapitel 2 bis 4 die Grundlagen, der Stand der Wissenschaft und Technik sowie die verwendete Versuchsumgebung dargelegt. Innerhalb der Grundlagen werden die wesentlichen Aspekte von elektrischen Energiespeichern, der Bearbeitung mittels Laserstrahlung und der Optimierungen mittels Genetischer Algorithmen beschrieben. In Kapitel 3 wird, ausgehend von einer Vielzahl relevanter Fügeverfahren zur Verbindung von Batteriezellen, das in der Literatur vorliegende Wissen über die laserbasierte Zellkontaktierung zusammengefasst. Außerdem werden für die vorliegende

Arbeit relevante Ansätze für vergleichbare Optimierungsaufgaben vorgestellt. Den Abschluss dieses Kapitels bilden eine Zusammenfassung des Stands der Wissenschaft und Technik sowie ein daraus abgeleiteter Handlungsbedarf. Anschließend werden in Kapitel 4 die verwendete Systemtechnik, die Versuchsaufbauten und die Werkstoffe sowie die Auswertemethodik erläutert. In Kapitel 5 wird die Auslegung der Kontaktierung untersucht. Hierbei wurde zunächst eine vergleichende Studie zwischen verschiedenen Strategien zum gepulsten Laserstrahlschweißen vorgestellt. Darauf aufbauend werden geeignete Parameter zur Kontaktierung ermittelt und eine Auslegungsmethode für die Anbindungsfläche abgeleitet. Das nachfolgende Kapitel 6 beinhaltet den Einfluss der Kontaktierung auf die Zelle. Hierfür wurde zum einen untersucht, welche Temperaturveränderungen innerhalb der Zelle durch den Schweißprozess hervorgerufen werden und zum anderen wurde die Veränderung der Zellkapazität beim Überschreiten der kritischen Zelltemperatur gemessen. In Kapitel 7 wird eine Methode zur simulationsgestützten Auslegung des Zellverbinders beschrieben und verifiziert. Die Anwendung und die Bewertung dieser Methode sowie des Prozesses zur Kontaktierung von zylindrischen Zellen werden in Kapitel 8 anhand eines Zellverbunds beschrieben. Den Abschluss dieser Arbeit bildet die Schlussbetrachtung, in der eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten gegeben werden.

<b>Kapitel 2 bis 4</b> Grundlagen / Stand d. Wissenschaft u. Technik / Versuchsumgebung			
<b>Kapitel 5</b> Auslegung Kontaktierung  <i>Vergleich von Strategien</i>  <i>Prozessunter- suchung</i>  <i>Auslegung der Anbindungs- fläche</i>	<b>Kapitel 6</b> Zelleigen- schaften  <i>Thermische Belastung</i>  <i>Einfluss auf die Kapazität</i>	<b>Kapitel 7</b> Topologie- optimierung  <i>FEM- Simulation</i>  <i>Genetischer Algorithmus</i>  <i>Multikriterielle Optimierung</i>	<b>Kapitel 8</b> Herstellung eines Zellverbunds  <i>Auslegung des Zellverbinders</i>  <i>Herstellung des Zellverbunds</i>  <i>wirtschaftl. / tech. Bewertung</i>
<b>Kapitel 9</b> Schlussbetrachtung			

Abbildung 1-1: Aufbau der vorliegenden Arbeit mit Bezug zu den Lösungsbausteinen der einzelnen Kapitel



## 2 Grundlagen

### 2.1 Allgemeines

Für die elektrische Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen mittels Laserstrahlung müssen sowohl die Eigenschaften der Batteriezelle als auch die Fügeprozesse berücksichtigt werden. Daher werden in diesem Kapitel sowohl die elektrochemischen und elektrotechnischen Eigenschaften der Zelle und des Energiespeichers betrachtet als auch die Grundlagen der Lasermaterialbearbeitung erläutert.

Für ein besseres Verständnis der Prozessanforderungen werden der Aufbau und die Funktionsweise von Batteriezellen sowie deren Verbindung zu Energiespeichern beschrieben. Insbesondere wird in diesem Kapitel auf die elektrische Kontaktierung und deren Anforderungen eingegangen. Für die Erläuterung der Strahl-Stoff-Wechselwirkung von gepulster Laserstrahlung werden aus den allgemeinen Grundlagen der Laserstrahlung die speziellen Unterschiede der gepulsten Strahlung gegenüber der kontinuierlich emittierenden Strahlung abgeleitet und vorgestellt. Weiterhin werden die notwendigen Voraussetzungen für das Verständnis der Optimierung durch evolutionäre Algorithmen geschaffen, welche bei der geometrischen Auslegung des Zellverbinders in dieser Arbeit zum Einsatz kamen.

### 2.2 Elektrische Energiespeicher

#### 2.2.1 Allgemeines

Die Technologien zur Speicherung von elektrischer Energie sind sehr vielfältig. So existieren beispielsweise elektrische, elektrochemische, mechanische und thermische Energiespeichersysteme. Die direkte Speicherung von elektrischer Energie, z. B. in Kondensatoren, ist durch eine hohe Effizienz, aber auch durch eine, im Vergleich zu den anderen Verfahren, geringe Speicherkapazität gekennzeichnet. Dieser Nachteil wird durch den Einsatz von elektrochemischen Speichersystemen überwunden (STADLER 2014, S. 229). Diese Energiespeichersysteme sind aus einer Vielzahl von einzelnen Batteriezellen aufgebaut. Aufgrund der überlegenen Energie- und Leistungsdichte gegenüber anderen Materialkombinationen (z. B. Nickel-Metallhydrid) werden hierfür derzeit vor allem *Lithium-Ionen-Zellen* eingesetzt (KARLE 2015, S. 78). Diese galvanischen Zellen bilden durch Zusammenschaltung den Hauptbestandteil des Energiespeichers. In der Literatur findet sich der Begriff *Lithium-Ionen-*

*Zelle* gleichbedeutend mit *Lithium-Ionen-Batterie*, *-Akku* oder *-Akkumulator*, welche in einem Batteriesystem verbaut ist. Innerhalb dieser Arbeit werden hierfür die Begriffe *Lithium-Ionen-Zelle* und *Batteriezelle* verwendet. In den folgenden Abschnitten wird der grundlegende Aufbau von Batteriezellen sowie des Energiespeichers betrachtet. Auf die detaillierte elektrochemische Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle wird in der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen. Hierfür wird auf entsprechende Literatur, z. B. KORTHAUER (2013), verwiesen.

### 2.2.2 Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle

Unter dem Begriff *Lithium-Ionen-Zelle* lassen sich eine Vielzahl von verschiedenen Zelltypen unterschiedlicher Materialkombinationen zusammenfassen. Abhängig von den Bestandteilen zeichnen sich Lithium-Ionen-Zellen durch unterschiedliche Eigenschaften bezüglich Energiedichte, Lebensdauer und Sicherheit aus. Die Gemeinsamkeit ist der Einsatz von Lithium-Ionen ( $\text{Li}^+$ ) als positive Ladungsträger, welche beim Be- und Entladevorgang durch einen Elektrolyten diffundieren und in den Aktivmaterialien eingelagert werden. (KORTHAUER 2013, S. 14). In Abbildung 2-1 ist der Aufbau und die Funktionsweise anhand des Entladevorgangs schematisch dargestellt.

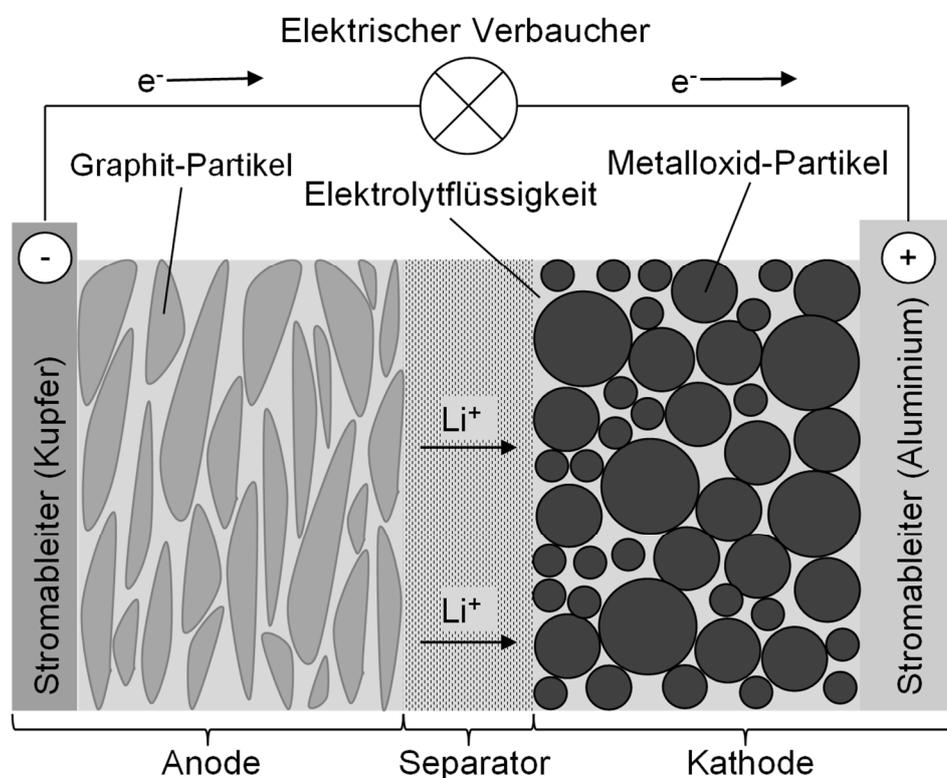


Abbildung 2-1: Aufbau und schematische Funktionsweise des Entladevorgangs einer Lithium-Ionen-Zelle (in Anlehnung an KORTHAUER 2013, S. 15)

Die Batteriezelle besteht aus einer Anode und einer Kathode, welche durch einen ionendurchlässigen, elektrisch isolierenden Separator getrennt sind. Der ionenleitende Elektrolyt benetzt das gesamte Innere der Zelle und ermöglicht somit den Transport der Lithium-Ionen. Die elektrische Verbindung zwischen den Elektroden wird über einen äußeren Stromkreis realisiert. Die Elektroden bestehen anodenseitig aus mit Graphitstrukturen beschichteten Kupferfolien und kathodenseitig aus mit Metalloxidmaterialien beschichteten Stromableitern aus Aluminium. Als Aktivmaterialien der Kathode kommen Lithium-Übergangsmetall-Verbindungen zum Einsatz (KORTHAUER 2013, S. 31). Lithium-Eisenphosphat (LFP) besitzt hierbei vergleichsweise überlegene Eigenschaften in Bezug auf die Lebensdauer und die Sicherheit. Aus diesem Grund wird LFP oft eingesetzt, wenn keine hohen Anforderungen an die Energiedichte und die Leistungsdichte gestellt werden, wie z. B. in stationären Energiespeichersystemen (KORTHAUER 2013, S. 31-35).

Beim Ladevorgang wird das Aktivmaterial der positiven Elektrode oxidiert. Unter Abgabe eines Elektrons verlassen die Lithium-Ionen den Kristall der Kathode (*Deinterkalation*), gehen in den Elektrolyt über und wandern durch den permeablen Separator zur Anode. Dort findet die Reduktion statt. Unter Aufnahme eines Elektrons aus dem externen Stromkreis verlassen die Lithium-Ionen den Elektrolyt und werden in das Aktivmaterial der Anode eingelagert (*Interkalation*). Der umgekehrte Vorgang wird als Entladen bezeichnet. (KORTHAUER 2013, S. 21 ff.)

Neben den unterschiedlichen Aktivmaterialien der Kathode können Lithium-Ionen-Zellen anhand der Bauform kategorisiert werden. Wie in Abbildung 2-2 gezeigt, wird hierbei zwischen *zylindrischen Zellen*, *prismatischen Zellen* und *Flachzellen* unterschieden (KAMPKER 2014, S. 54).

### **Zylindrische Zellen**

*Zylindrische Zellen* oder *Rundzellen* sind durch die standardisierten Maße die am weitesten verbreiteten Zelltypen, was einen niedrigen Preis der Zellen zur Folge hat (BURDA 2015, S. 35). Besonders häufig eingesetzt werden Zellen der Formate 18650 (Durchmesser: 18 mm, Länge: 65 mm) und 26650 (Durchmesser 26 mm, Länge 65 mm). Gegenüber anderen Bauformen weist die zylindrische Zelle fertigungstechnische Vorteile auf, da ihre Herstellung durch einfaches Wickeln des Verbunds aus Elektroden und Separator um einen Dorn erfolgt. Dieser Verbund wird mit dem Elektrolyt in ein mechanisch stabiles und formfestes Metallgehäuse aus vernickeltem Stahl eingebracht, wodurch die Sicherheit dieser Zellen vergleichsweise hoch ist. Auf Zellebene weisen zylindrische Zellen eine sehr hohe spezifische Energiedichte auf.

Geometriebedingt ist die Energiedichte auf Modulebene aufgrund ineffizienter Bauraumausnutzung reduziert. Durch das große Volumen-Oberflächen-Verhältnis der Zellen können erhöhte Temperaturgradienten in der Zelle entstehen, was ein vergleichsweise aufwendiges Kühlprinzip erforderlich macht. (KAMPKER 2014, S. 55-56)

### **Prismatische Zellen**

*Prismatische Zellen* werden beispielsweise in Mobiltelefonen eingesetzt, da aufgrund der flachen Bauform der Geräte der Einsatz von zylindrischen Zellen nicht sinnvoll ist. Die Herstellung der Zellen erfolgt durch Wickeln um einen ovalen Dorn oder durch Stapeln der Einzelelektroden (RÖTH ET AL. 2013, S. 302), welche anschließend in ein stabiles quaderförmiges Gehäuse eingebracht werden. Auf Zellebene weisen prismatische Zellen eine im Vergleich zu zylindrischen Zellen geringe Energiedichte auf, die durch eine effiziente Bauraumausnutzung auf Modulebene ausgeglichen oder sogar überkompensiert wird (BURDA 2015, S. 36). Die Zellgeometrie ermöglicht eine einfache Anordnung und Assemblierung zu Batteriemodulen. Die Kühlung der Zellen erfolgt meist über eine Kühlplatte, welche thermisch mit dem Zellboden verbunden ist.

### **Flachzellen**

Die Herstellung des Zellstapels erfolgt bei *Flachzellen* analog zu prismatischen Zellen durch Wickeln oder Einzelblattstapeln, allerdings wird der Zellstapel anschließend in einer Verbundfolie verschweißt (BURDA 2015, S. 36). Die hohe Energiedichte dieser Zellen ist auf die dünne und leichte Verbundfolie zurückzuführen. Für die Montage zu Batteriemodulen müssen die Zellen in ein festes Gehäuse gespannt werden, wodurch die Leichtbauvorteile auf Zellebene teilweise verloren gehen. Die Kühleigenschaft der Zellen ist aufgrund des großen Volumen-Oberflächen-Verhältnisses vergleichsweise gut, sodass große Temperaturgradienten innerhalb der Zelle vermieden werden können. (KAMPKER 2014, S. 54-55)

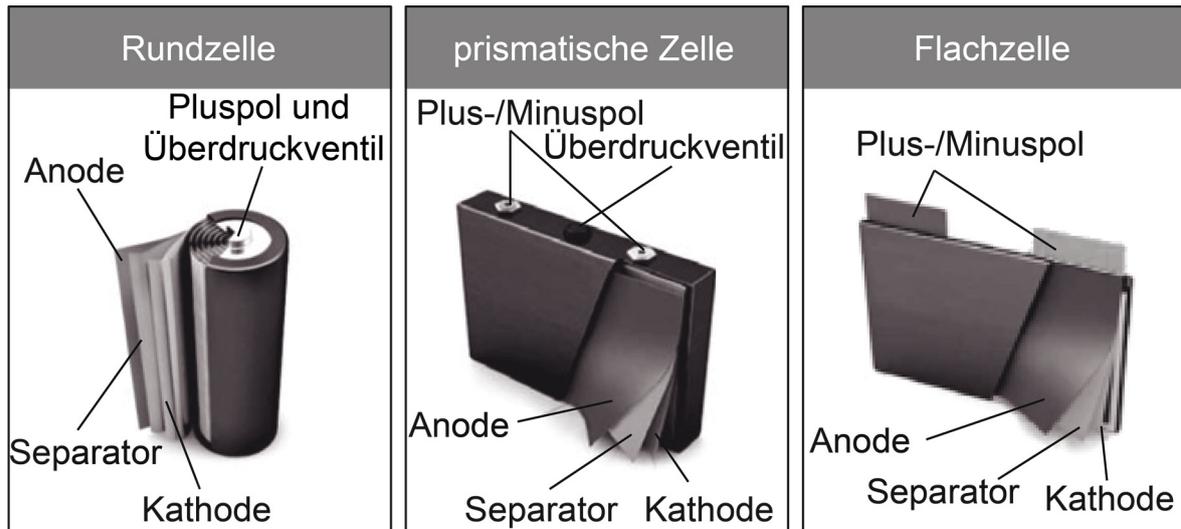


Abbildung 2-2: Aufbau bzw. Ausführung der unterschiedlichen Zellkonzepte (nach KAMPKER 2014, S. 54)

### 2.2.3 Aufbau von elektrischen Energiespeichern

Ein *elektrischer Energiespeicher* kann je nach Einsatzbereich aus einigen wenigen bis mehreren hundert oder tausend Lithium-Ionen-Zellen aufgebaut sein. Durch Reihen- und Parallelschaltungen der Zellen werden das erforderliche Spannungsniveau und die gewünschte Gesamtenergie erreicht. Darüber hinaus können eine Vielzahl von zusätzlichen mechanischen und elektrischen Komponenten verbaut werden. Der Grundaufbau eines Energiespeichers ist in Abbildung 2-3 schematisch dargestellt und wird im Folgenden beschrieben.

#### Zellverbund

In Energiespeichersystemen wird für die Zellen eine Kombination aus Parallel- und Serienschaltung verwendet (KAMPKER 2014, S. 56). Bei einer seriellen Verschaltung muss jede der in Reihe geschalteten Zellen überwacht werden, was einen erheblichen Aufwand bedeutet. Aus diesem Grund werden bevorzugt mehrere parallel geschaltete *Zellverbunde* seriell miteinander verbunden (FAHLBUSCH 2015, S. 282). Hierfür werden die Zellen mit einem geeigneten Verfahren kontaktiert, sodass sich ein Kontaktwiderstand  $R_K$  ergibt. Weiterhin wird zur Parallelschaltung ein Zellverbinder eingesetzt, wodurch innerhalb des Zellverbunds ein weiterer Widerstand  $R_V$  auftritt.

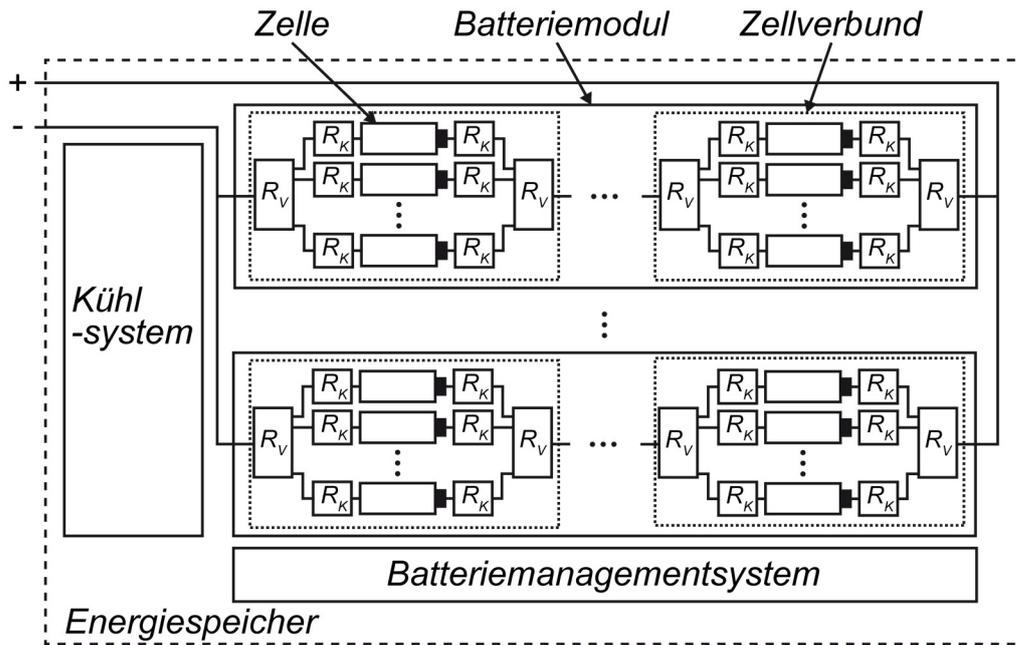


Abbildung 2-3: Aufbau eines Energiespeichers (in Anlehnung an SCHRAMM ET AL. 2017, S. 239-240)

Ein Zellverbund hat die Spannungslage einer Lithium-Ionen-Zelle, weist allerdings dem gegenüber eine erhöhte Kapazität auf. Um die in Hochvoltspeichern benötigte Spannung zu erreichen, werden die Zellverbunde seriell kombiniert, sodass sich die Einzelspannungen der Verbunde addieren. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass zwischen den parallel verbundenen Zellen ein Ladungsausgleich stattfinden kann. Dadurch gleicht sich im Ruhezustand das Spannungsniveau an, was den Überwachungsaufwand deutlich reduziert. Weiterhin führt der Ausfall einer einzelnen Zelle nicht zum Versagen des gesamten Systems, sondern reduziert lediglich die zur Verfügung stehende Kapazität (KORTHAUER 2013, S. 96-98).

### Batterieminodul

Der Energiespeicher besteht aus mehreren miteinander verbundenen *Batterieminodulen*. Ein Batterieminodul besteht aus einer Serienschaltung der einzelnen Zellverbunde. Dabei werden die Spannungen der einzelnen Verbunde addiert, wodurch hohe Energie- bzw. Leistungsanforderungen mit kleinen elektrischen Strömen und dementsprechend auch kleinen Leiterquerschnitten realisiert werden können. (KORTHAUER 2013, S. 96-97)

In der Regel wird das Batterieminodul von einem eigenen Gehäuse umgeben und verfügt über zugängliche elektrische Anschlüsse für die Assemblierung im Energiespeicher (BURDA 2015, S. 92 ff.). Darüber hinaus sind zusätzlich Sensoren zur

Überwachung der Zellen und der Temperatur verbaut. Der modulare Aufbau erleichtert die Handhabbarkeit und ermöglicht den Austausch defekter Teile des Speichers bei Wartungsarbeiten. (KAMPKER 2014, S. 56-58)

### Energiespeicher

Der *Energiespeicher*, auch *Batteriesystem* genannt, umfasst die Gesamtheit aller Batteriemodule inklusive dazugehöriger Komponenten. So stellt das Kühlsystem des Energiespeichers einen Betrieb innerhalb des zulässigen Temperaturbereichs sicher, da ansonsten mit beschleunigter Zellalterung sowie stark reduzierter Leistungsfähigkeit zu rechnen wäre. Die Steuerung und Überwachung des Speicherzustands erfolgt hierbei über das zentrale *Batterie-Management-System (BMS)*, welches alle notwendigen Funktionen, einschließlich des elektrischen und thermischen Managements sowie der Ladezustandsbestimmung, ausführt. Die einzelnen Komponenten eines Energiespeichers sind in Abbildung 2-4 am Beispiel des *Energy Neighbor*<sup>1</sup> veranschaulicht.

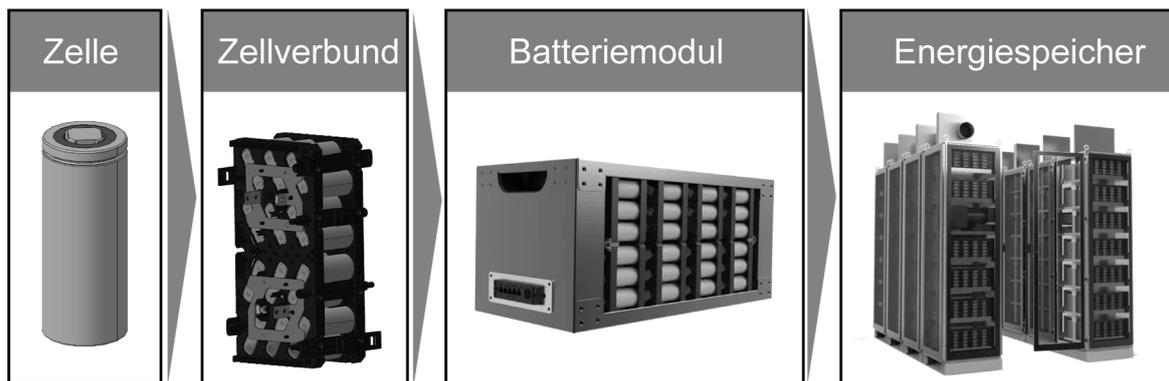


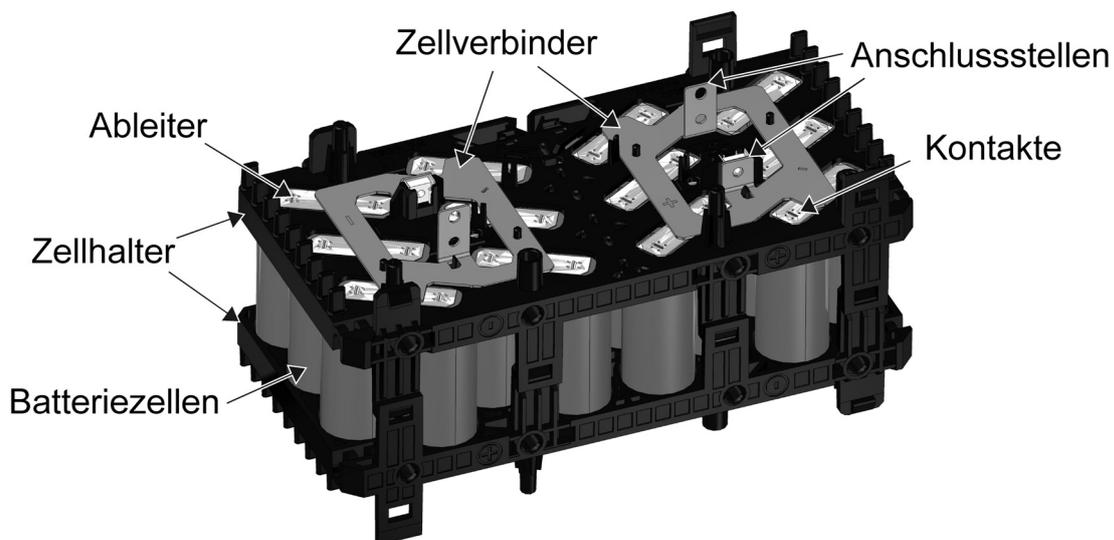
Abbildung 2-4: Komponenten eines Energiespeichers am Beispiel des *Energy Neighbor*

#### 2.2.4 Anforderungen an die elektrische Verbindung eines Zellverbunds

Die *elektrische Verbindung* wird mittels *Zellverbindern* realisiert und stellt den Zusammenschluss von mehreren Zellen zu einem parallelen Zellverbund dar. In Abbildung 2-5 sind zwei Zellverbände, bestehend aus 24 Batteriezellen, gezeigt, bei welchen der elektrische Strom aus den jeweils zwölf parallel verbundenen Zellen über die *Kontakte* und das *Ableiterblech* in den Zellverbinder fließt. Das Ableiterblech stellt in diesem Zusammenhang ein Zusatzelement dar, welches einen anderen

<sup>1</sup> Der *Energy Neighbor* (MÜLLER ET AL. 2017) ist ein dezentraler Energiespeicher mit einer Kapazität von 200 kWh, welcher innerhalb des Forschungsprojekts *EEBatt* von der Technischen Universität München, der Varta Storage GmbH und dem Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) entwickelt wurde. Der Feldtest des Speichers wurde in Moosham in Oberbayern durchgeführt.

Werkstoff und eine andere Materialstärke als der Zellverbinder aufweist. Dies ist notwendig, da die Materialstärke der Zelle wesentlich kleiner ist als die notwendige Dicke des Zellverbinders und somit die *elektrische Kontaktierung* mit einem stoffschlüssigen Fügeverfahren nicht möglich wäre. Die Fügeverbindung zwischen dem Ableiterblech und dem Zellverbinder wird innerhalb dieser Arbeit als *Verbindungsstelle* bezeichnet. Innerhalb des Zellverbinders addieren sich die Ströme der Zellen und können über die *Anschlussstellen* an den nächsten Zellverbund weitergegeben werden (vgl. Abbildung 2-3).



*Abbildung 2-5: Darstellung von zwei Zellverbunden, bestehend aus jeweils zwei mal zwölf parallel geschalteten zylindrischen Batteriezellen; die Zellen sind über die Kontakte mit den Ableitern verbunden; der elektrische Strom der Zellen fließt über die Zellverbinder zu den Anschlussstellen.*

Die Anforderungen an die elektrische Verbindung bestehen darin, dass zum einen ein möglichst geringer Widerstand auftreten muss. Zum anderen müssen alle parallel verbundenen Zellen einen möglichst ähnlichen Verbindungswiderstand aufweisen. Weiterhin sollte die Masse des Zellverbinders möglichst gering sein. Im Folgenden werden diese drei Aspekte genauer erläutert.

### **Geringer Widerstand**

Der Verbindungswiderstand setzt sich aus den Kontaktwiderständen der beiden Verbindungen *Zelle zu Ableiter* und *Ableiter zu Zellverbinder* sowie den Innenwiderständen des Ableiters und des Zellverbinders zusammen. Während der Kontaktwiderstand maßgeblich durch den Kontaktierungsprozess, durch die Anbin-

dungsfläche sowie durch die Anbindungsgeometrie beeinflusst wird, werden die Widerstände des Ableiters und des Zellverbinders durch die topologische Auslegung der Bauteile und durch den Werkstoff definiert.

Ein zu großer elektrischer Widerstand führt zu einer erhöhten Verlustleistung im Zellverbinder durch Erwärmung des Bauteils. Dies wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad des Gesamtsystems aus und reduziert die zur Verfügung stehende Kapazität des Speichers (SCHMIDT 2015, S. 14). Die elektrischen Ströme müssen demnach innerhalb des Zellverbinders mit sehr niedrigen Verlusten fließen. Da sich die Ströme in einer parallelen Verschaltung innerhalb des Zellverbinders addieren, können, abhängig von der Zellanzahl und dem Zelltyp, sehr hohe Stromstärken auftreten. Am Beispiel des in Abbildung 2-5 dargestellten Zellverbunds von je zwölf Zellen werden bis zu 108 A erreicht<sup>2</sup>. Daher bestehen besondere Anforderungen an die spezifische elektrische Leitfähigkeit der Werkstoffe sowie an die leitende Querschnittsfläche. In der Regel werden deshalb als Werkstoffe hochleitfähige Metalle wie Kupfer oder Aluminium eingesetzt.

### **Gleicher Widerstand**

Ist der elektrische Widerstand im Zellverbinder für die parallel verbundenen Zellen unterschiedlich, so führt dies beim Laden und Entladen zu unterschiedlichen Stromstärken innerhalb der Zellen. Dieser Effekt der ungleichen Widerstände wurde von GOGOANA ET AL. (2014) und BRAND ET AL. (2016) untersucht. Beide wiesen am Beispiel unterschiedlicher Innenwiderstände eine ungleiche Stromverteilung innerhalb der Zellen nach. Insbesondere am Ende des Entladezyklus kann ein erhöhter Stromfluss den Alterungsprozess negativ beeinflussen (GOGOANA ET AL. 2014). Im schlimmsten Fall kann der sichere Betrieb des Energiespeichers nicht mehr gewährleistet werden (BRAND ET AL. 2016). Es lässt sich folgern, dass alle parallel verbundenen Zellen den gleichen Verbindungswiderstand aufweisen sollten.

### **Geringe Masse**

Eine geringe Masse des Zellverbinders ist aus Leichtbauaspekten zu bevorzugen. Besonders bei der Auslegung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen nimmt der Leichtbau eine zentrale Rolle innerhalb der Konstruktion der Energiespeicher ein. Durch eine Massenreduzierung der Komponenten des Energiespeichers kann die gravimetrische Energiedichte des Systems erhöht und damit die Reichweite von Elektrofahrzeugen verbessert werden. Eine Werkstoffeinsparung reduziert die Kosten des Energiespei-

---

<sup>2</sup> Maximaler Entladestrom einer Zelle: 9 A

chers und ist damit auch vorteilhaft für stationäre Energiespeichersysteme. Insbesondere Systeme mit hohen Energiespeicherkapazitäten beinhalten eine große Anzahl an Zellverbindern. So werden beispielsweise im Energiespeicher *Energy Neighbor* 3328 Zellverbinder eingesetzt, wodurch sich ein hohes Potenzial zur Werkstoffeinsparung und somit zur Kostenreduktion ergibt.

### **2.2.5 Anforderungen an die elektrische Kontaktierung von zylindrischen Zellen**

Die Anforderungen an die elektrische Kontaktierung der zylindrischen Lithium-Ionen-Zellen werden in diesem Abschnitt für das Verfahren des Laserstrahlschweißens erläutert. Nach SCHMIDT (2015) können diese in die Aspekte *Leichtbau*, *Produktion* und *Funktion* eingeteilt werden. Während die Bedeutung des Leichtbaus bereits im Zusammenhang mit den Anforderungen an die elektrische Verbindung erläutert wurde, wird im Folgenden auf die Bereiche *Produktion* und *Funktion* eingegangen.

#### **Produktion**

Die elektrische Kontaktierung der Zellen stellt einen Teilschritt in der Montage des Batteriesystems dar. Innerhalb der Serienproduktion besteht die Notwendigkeit von möglichst niedrigen Fertigungszeiten, was hohe Prozessgeschwindigkeiten für die Kontaktierung voraussetzt. Insbesondere bei größeren Speichersystemen, wie z. B. dem *Energy Neighbor*, nimmt der Kontaktierungsprozess aufgrund der hohen Anzahl von Kontakten (*Energy Neighbor*: ca. 40.000) einen signifikanten Anteil der Montagezeit ein.

Aufgrund des Aufbaus einer zylindrischen Zelle (vgl. Abschnitt 2.2.2) bestehen besonders hohe Anforderungen an die Kontaktierung des negativen Zellpols. Die Kontaktierung des positiven Zellpols findet auf einem Blech oberhalb des Sicherheitsventils statt, sodass kein direkter Kontakt zu den Zellmaterialien besteht. Der Aufbau des negativen Zellpols ist in Abbildung 2-6 mittels einer computertomografischen Aufnahme verdeutlicht. Für die Kontaktierung des Zellbodens wird ein Ableiterblech auf das 0,2 mm dicke Zellgehäuse geschweißt. Ein unbeabsichtigtes Eindringen der Laserstrahlung in das Zellgehäuse ist in jedem Fall zu vermeiden, da dadurch zum einen die Zelle beschädigt werden kann (die Folge kann ein interner Kurzschluss sein) und zum anderen durch eine dabei verursachte Undichtigkeit der Elektrolyt aus der Zelle austritt. Aufgrund der hohen Anzahl an Kontakten innerhalb des Energiespeichers besteht demnach die Notwendigkeit einer sehr hohen Reproduzierbarkeit bezüglich der Einschweißtiefe.

Eine weitere Anforderung an die Kontaktierung resultiert aus den temperaturempfindlichen Komponenten der Zelle. So beginnt die Zersetzung des Elektrolyten bereits ab einer Temperatur von 70 °C (KORTHAUER 2013, S. 65). Die durch den Schweißprozess eingebrachte bzw. auftretende Wärme kann aufgrund des Kunststoff-Zwischenrings nicht direkt an die Zellmaterialien übertragen werden. Allerdings ist dieser in der Mitte des Gehäuses über den Dorn sowie ein zellinternes Ableiterblech mit dem Zellwickel verbunden. Infolgedessen besteht die Anforderung, dass die Temperatur in der Mitte des Zellbodens während des Produktionsprozesses den kritischen Wert von 70 °C nicht überschreitet.

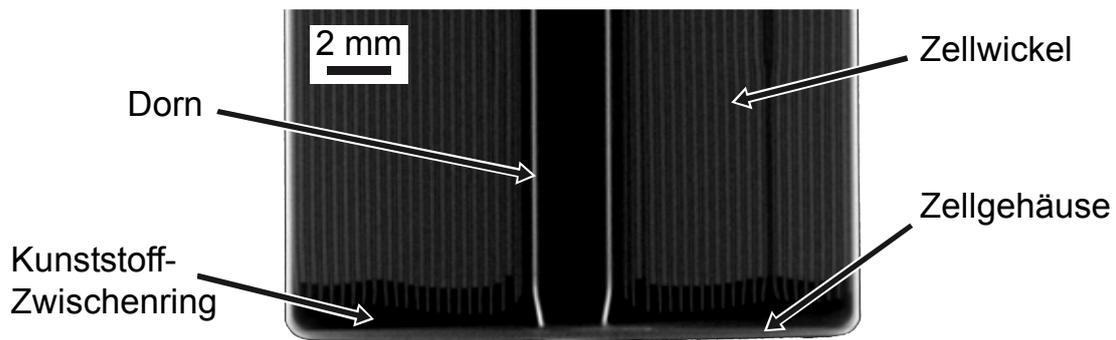


Abbildung 2-6: Computertomografie-Aufnahme des Zellbodens (negativer Pol) einer zylindrischen Batteriezelle (nach EBERT ET AL. 2017)

### Funktion

Die Hauptfunktion der Kontaktierung besteht darin, den elektrischen Strom innerhalb des Energiespeichers möglichst verlustfrei zu übertragen. In Energiespeichersystemen können, abhängig vom Zelltyp und dem Einsatzgebiet, kurzzeitig sehr hohe Stromstärken im Bereich von einigen hundert Ampere auftreten (POMPETZKI 2013). Selbst geringe Übergangswiderstände führen dabei zu signifikanten Verlusten durch die Joulesche Erwärmung. Die durch diesen Effekt generierte Wärme führt zu einer Temperaturerhöhung der Batteriezellen, welche zum Teil durch das Kühlsystem ausgeglichen werden kann. Jedoch reduziert dies die Effizienz des Gesamtsystems.

Weitere Anforderungen beziehen sich auf die mechanische Festigkeit der Verbindungen. Diese Verbindungen sind im Speziellen vom jeweiligen Einsatzgebiet des Energiespeichers abhängig. Verallgemeinerte Anforderungskriterien wurden von den Vereinten Nationen festgelegt. In den *Empfehlungen für die Beförderung gefährlicher Güter* sind unter Abschnitt 38.3 (allgemein als UN38.3 bezeichnet) ausführliche Testzyklen für Lithium-Metall- und Lithium-Ionen-Zellen sowie -Batterien definiert (WEHRSTEDT ET AL. 2015, S. 434-444). Aus diesem Grund wurde die UN38.3 in den meisten Bereichen als Standardprüfverfahren festgelegt. Die Norm beinhaltet die folgenden acht Einzeltests (T.):

- T.1: Höhensimulation
- T.2: Thermische Prüfung
- T.3: Schwingung
- T.4: Schlag
- T.5: Äußerer Kurzschluss
- T.6: Aufprall/Quetschung
- T.7: Überladung
- T.8: Erzwungene Entladung

Für die Auslegung bezüglich der mechanischen Anforderungen sind die beiden Einzeltests *T.3: Schwingung* und *T.4: Schlag* heranzuziehen. Die weiteren Prüfverfahren beziehen sich auf den gesamten Energiespeicher. So beschreibt beispielsweise der Test *T.6: Aufprall/Quetschung* das Verhalten des Speichers im Kollisionsversuch und sein Ergebnis wird damit maßgeblich durch die konstruktive Auslegung beeinflusst. Die beiden innerhalb dieser Arbeit relevanten Einzeltests *T.3: Schwingung* und *T.4: Schlag* werden nachfolgend beschrieben.

### **UN38.3 T.3: Schwingung**

Bei dem Prüfverfahren *T.3: Schwingung* werden die Batterien auf einem Schwingungsgenerator befestigt. Die Frequenz der erzeugten Sinusschwingung steigt innerhalb von 15 Minuten von 7 Hz auf 200 Hz an und wird anschließend wieder innerhalb eines gleichlangen Zeitraums auf 7 Hz reduziert. Der Zyklus wird für alle drei orthogonalen Befestigungsmöglichkeiten der Zelle vier Mal wiederholt. Batterien mit einer Masse von bis zu 12 kg werden von 7 Hz bis 18 Hz mit einer Spitzenbeschleunigung von  $1 \cdot g^3$  beaufschlagt. Bis zu einer Frequenz von 50 Hz wird die Beschleunigung kontinuierlich auf bis zu  $8 \cdot g$  erhöht und anschließend konstant gehalten. Der Test gilt als erfolgreich bestanden, wenn keine Undichtigkeit, keine Zerlegung und kein Feuer während oder nach dem Testzyklus auftreten. Zusätzlich darf der durch den Test verursachte Spannungsabfall der Zelle nicht größer als 10% sein. (WEHRSTEDT ET AL. 2015, S. 441)

### **UN38.3 T.4: Schlag**

Die zu untersuchende Batterie wird in einer starren Schlagprüfvorrichtung befestigt. Beansprucht wird diese mit einem halbsinusförmigen Schlag bei einer Spitzenbeschleunigung von 150 g und einer Pulsdauer von 6 ms. Dieser Test ist jeweils drei Mal für beide Seiten aller drei Raumrichtungen durchzuführen. Die Anforderung gilt

---

<sup>3</sup> g = Erdbeschleunigung von ca. 9,81 m/s<sup>2</sup>

unter denselben Kriterien wie im Prüfverfahren *T.3: Schwingung* als erfüllt. (WEHRSTEDT ET AL. 2015, S. 441 ff.)

## **2.3 Lasermaterialbearbeitung**

### **2.3.1 Allgemeines**

Der Begriff Laser ist ein Akronym aus der englischen Sprache für *light amplification by stimulated emission of radiation* und beschreibt den physikalischen Vorgang der Verstärkung von Strahlung durch stimulierte Emission. In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Lasertechnik erläutert, indem zunächst ein Überblick über die Strahlführung und die auftretenden Prozessgrößen gegeben wird. Anschließend wird der Laserstrahlschweißprozess und im Speziellen das Schweißen mit gepulster Laserstrahlung erläutert. Auf die Strahlerzeugung wird innerhalb dieser Arbeit nicht eingegangen. Hierfür wird auf POPRAWE (2005) und GRAF & HÜGEL (2009) als weiterführende Literatur zu diesem Themengebiet verwiesen.

### **2.3.2 Laserstrahlführung und Prozessgrößen**

#### **Strahlführung**

Um den in der Laserstrahlquelle erzeugten Strahl für die Werkstoffbearbeitung einzusetzen, muss dieser zum Werkstück geführt und auf diesem fokussiert werden. Für die Strahlführung werden zwei verschiedene Systeme eingesetzt (GRAF & HÜGEL 2009, S. 84-85). Zum einen kann die Laserstrahlung mittels Planschrägsiegeln abgelenkt werden. Dieser Aufbau wird vor allem bei Kohlenstoffdioxidlasern (CO<sub>2</sub>-Laser) und gepulster Strahlung mit sehr hohen Spitzenintensitäten verwendet. Nachteilig sind dabei Einschränkungen im Anlagenaufbau, bedingt durch die begrenzte Entfernung zwischen Strahlquelle und Werkstück aufgrund der freien Strahlführung. Laserstrahlung im nahen infraroten und sichtbaren Bereich kann mittels Lichtleitkabel geführt werden. Dabei wird das Prinzip der Totalreflexion ausgenutzt, wobei verlustarm Distanzen von mehreren hundert Metern überbrückt werden können. Die damit verbundene Flexibilität und Einfachheit des Systemaufbaus bietet vor allem für den industriellen Einsatz erhebliche Vorteile (GRAF & HÜGEL 2009, S. 67 ff.).

Die Strahlformung für die Materialbearbeitung wird durch eine Optik mit Linsen oder gekrümmten Spiegeln realisiert. Um eine thermische Ausdehnung der Elemente zu

verhindern, werden diese oft mit einer Kühlung versehen (GRAF & HÜGEL 2009, S. 85-87). Außerdem werden die optischen Elemente während des Schweißvorgangs durch einen horizontalen Luftstrom, den sogenannten Cross-Jet, geschützt. Dieser verhindert, dass Metallspritzer, die während des Bearbeitungsprozesses entstehen, die Optik beschädigen.

Die Positionierung des Laserstrahls auf dem Werkstück kann durch ein Scannersystem erfolgen. Zwei orthogonal angeordnete, drehbare Spiegel lenken den Strahl in beide Koordinatenrichtungen der Bearbeitungsebene ab. Auf diese Weise kann eine sehr hohe Ablenkgeschwindigkeit und damit einhergehend eine sehr hohe Verfahrensgeschwindigkeit der Prozesszone auf dem Werkstück erreicht werden. Eine Kombination aus Strahlformung und Scannersystem wird als Scanneroptik bezeichnet. (GRAF & HÜGEL 2009, S. 96)

### Laserstrahlkaustik

Durch die Optik wird der Laserstrahl auf dem Werkstück fokussiert. Im Fokus ist der Strahldurchmesser am kleinsten, sodass an dieser Stelle die höchste Intensität auftritt. Für die Beschreibung der Lasertechnik ist das Modell der geometrischen Optik mit exakt parallelen Strahlenbündeln nicht hinreichend genau. Deshalb wird die Gaußsche Optik verwendet, deren resultierende Strahltaille in Abbildung 2-7 dargestellt ist. Der halbe Öffnungswinkel  $\theta$  des Strahls im Bereich nach der Taille sowie der minimale Durchmesser der Strahlung im Fokuspunkt, welcher durch den Fokusedurchmesser  $d_f$  beschrieben wird, sind von der Wellenlänge der Laserstrahlung  $\lambda$  abhängig. Weiterhin beschreibt  $z$  den Abstand von der Strahltaille in Ausbreitungsrichtung und  $d(z)$  den zugehörigen Strahldurchmesser. Der Zusammenhang dieser beiden Werte wird in Formel (2-1) erläutert. Hierbei ist  $z_R$  die Rayleighlänge, d. h. der Abstand von der Fokusebene, bei welcher sich der Strahldurchmesser auf einen Wert von  $\sqrt{2} \cdot d_f$  vergrößert hat.

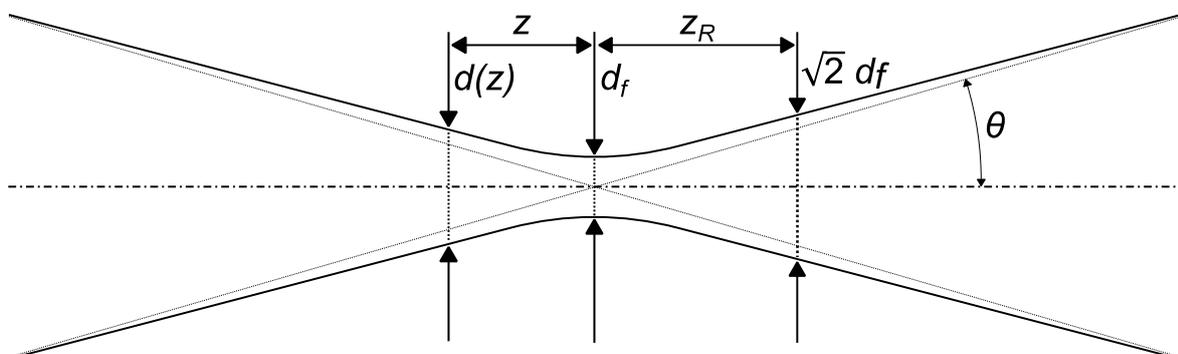


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Strahltaille eines Laserstrahls (nach BUCHFINK 2008, S. 44)

Es gilt:

$$d(z) = d_f \cdot \sqrt{1 + (z/z_R)^2} \quad (2-1)$$

mit

- $d(z)$ : Strahldurchmesser im Abstand  $z$  von der Strahltaile
- $d_f$ : Fokusbereich
- $z_R$ : Rayleighlänge

Je höher die Strahlqualität der Laserstrahlung ist, desto geringer ist bei einem gegebenen halben Öffnungswinkel  $\theta$  der minimale Fokusbereich  $d_f$ . Für die Bewertung der Strahlqualität kann das Strahlparameterprodukt (*SPP*) bzw. die Beugungsmaßzahl  $M^2$  herangezogen werden. Es gilt:

$$SPP = \theta \cdot d_f/2 = M^2 \cdot \lambda/\pi \quad (2-2)$$

mit

- SPP*: Strahlparameterprodukt
- $\theta$ : Halber Öffnungswinkel
- $M^2$ : Beugungsmaßzahl
- $\lambda$ : Wellenlänge der Laserstrahlung

### 2.3.3 Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück

Der Laserstrahl kann zur Bearbeitung eines Werkstücks für viele Verfahren eingesetzt werden. Hierzu zählen beispielsweise das Laserstrahlschweißen, das Laserstrahlschneiden oder das Laserstrahlhärten. Beim Auftreffen von Laserstrahlung auf einer Werkstückoberfläche wird ein Teil der Strahlung reflektiert. Der übrige Anteil dringt in das Werkstück ein und wird in diesem absorbiert und gegebenenfalls transmittiert. Das Verhältnis dieser drei Effekte wird zum einen von den optischen Werkstoffeigenschaften und der Werkstückdicke und zum anderen von den Eigenschaften der Laserstrahlung, wie z. B. der Wellenlänge, der Polarisation und dem Einfallswinkel beeinflusst (GRAF & HÜGEL 2009, S. 116). Die Summe aus Reflexionsgrad  $R_G$ , Absorptionsgrad  $A_G$  und Transmissionsgrad  $T_G$  ergibt immer eins. Es gilt:

$$R_G + A_G + T_G = 1 \quad (2-3)$$

mit

- $R_G$ : Reflexionsgrad
- $A_G$ : Absorptionsgrad
- $T_G$ : Transmissionsgrad

Die entscheidende Größe für die Materialbearbeitung ist der Absorptionsgrad  $A_G$ , da im Werkstück die absorbierte Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt wird und die auftretenden physikalischen Effekte maßgeblich von der Temperatur in der Prozesszone und damit von der absorbierten Leistung bestimmt werden. In Abbildung 2-8 sind die verschiedenen Wechselwirkungseffekte zwischen Laserstrahl und Werkstück für verschiedene Bereiche der Laserstrahlintensität visualisiert. Bei einer kleinen Intensität wird der Werkstoff lokal aufgeheizt, ohne dass die Schmelztemperatur überschritten wird.

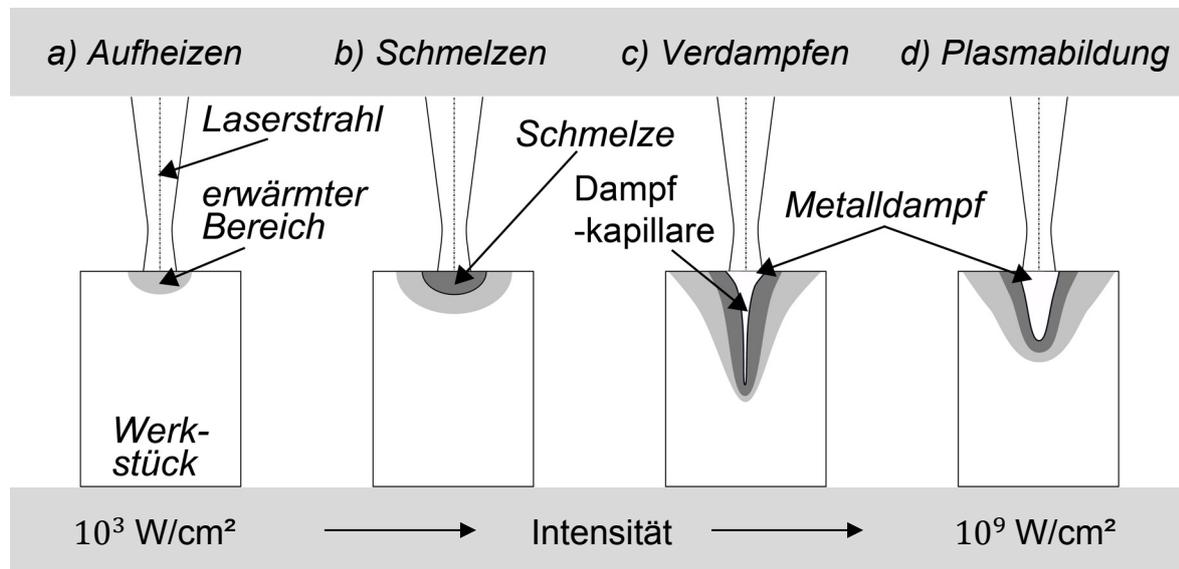


Abbildung 2-8: Wechselwirkung von Laserstrahl und Werkstück bei steigender Intensität und mögliche Wechselwirkungseffekte für metallische Werkstoffe; a) Aufheizen, b) Schmelzen, c) Verdampfen und d) Plasmabildung (nach GRAF & HÜGEL 2009, S. 2)

### Wärmeleitungsschweißen

Sobald die durch den Laserstrahl eingebrachte Energie ausreicht, um das Werkstück über die Schmelztemperatur zu erwärmen, entsteht Schmelze an der Werkstückoberfläche. Ein Vorgang, bei dem dies zur stoffschlüssigen Verbindungsbildung genutzt wird, wird als *Wärmeleitungsschweißen* bezeichnet. Er ist durch einen hauptsächlich konvektiven Energietransport innerhalb des Schweißbades sowie eine glatte Nahtoberfläche charakterisiert. Dieser Prozess ist in Abbildung 2-8 b) dargestellt. Die resultierenden Nähte weisen eine größere Schweißnahtbreite als Einschweißtiefe auf,

wodurch sich dieses Verfahren sehr gut für Stumpfstöße eignet. (GRAF & HÜGEL 2009, S. 3)

### Tiefschweißen

Steigt die Intensität der Laserstrahlung soweit an, dass der Werkstoff auch teilweise über die Verdampfungstemperatur erwärmt wird, entsteht eine *Dampfkapillare*. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass der Laserstrahl an den Wänden mehrmals reflektiert wird. Aus diesem Grund steigt der Anteil der absorbierten Laserstrahlung im Vergleich zum Wärmeleitungsschweißen deutlich an. Wie in Abbildung 2-8 c) veranschaulicht, weisen die Nähte, welche durch dieses Verfahren erzeugt werden, eine größere Einschweißtiefe als Schweißnahtbreite auf, weshalb dieses Verfahren als *Tiefschweißen* bezeichnet wird. Die Anwendung eignet sich besonders für die Bearbeitung von Überlappstößen. (GRAF & HÜGEL 2009, S. 3)

Bei einem weiteren Anstieg der Strahlungsintensität über den Bereich des Tiefschweißens hinaus kommt es vermehrt zur Plasmabildung innerhalb und oberhalb der Dampfkapillare. Aus der vergrößerten Absorption der Strahlung innerhalb des Plasmas resultieren eine abnehmende Einschweißtiefe und eine zunehmende Nahtbreite. Sobald eine kritische Intensität überschritten ist, kommt es zu einer nahezu vollständigen Abschirmung des Werkstücks durch das Plasma. Der Einfluss der *Plasmabildung* auf die Dampfkapillare ist in Abbildung 2-8 d) gezeigt. (GRAF & HÜGEL 2009, S. 3)

#### 2.3.4 Eigenschaften gepulster Laserstrahlung

Laserstrahlquellen können durch verschiedene Betriebsarten charakterisiert werden. Der sogenannte *continuous-wave-(cw)*-Betrieb zeichnet sich dadurch aus, dass die Leistung während der gesamten Bearbeitungszeit ein konstantes Niveau aufweist. Die von der Strahlquelle emittierte Energie  $E_E$  ist demnach von der Laserstrahlleistung  $P$  und der Zeit  $t$  abhängig. Es gilt:

$$E_E = P \cdot t \quad (2-4)$$

mit

- $E_E$ : Emittierte Energie
- $P$ : Laserstrahlleistung
- $t$ : Zeit

Die zweite Betriebsart ist die Bearbeitung mittels *gepulster Laserstrahlung*. Hierbei ist die Leistung nicht konstant, sondern wird über die Zeit mittels Laserpulsen abgegeben. Die Pulsform wird in periodischen Abständen wiederholt, wobei die Strahlquelle zwischen zwei Pulsen keine Leistung emittiert. Die in einem Puls enthaltene Energiemenge kann mittels Formel (2-5) berechnet werden. Es gilt:

$$E_P = \int_0^{\tau_P} P(t) dt \quad (2-5)$$

mit

- $E_P$ : Pulsenergie
- $\tau_P$ : Pulsdauer
- $P(t)$ : Pulsleistung in Abhängigkeit der Zeit

Der zeitliche Verlauf der Leistungsmodulation ist beispielhaft für den Rechteckpuls in Abbildung 2-9 schematisch dargestellt. Zur Charakterisierung dieser Pulsart dient vor allem die Pulsdauer  $\tau_P$  und die Pulsspitzenleistung  $P_{max}$ . Aufgrund der zeitlich konstanten Pulsleistung vereinfacht sich Formel (2-5) in diesem Fall wie folgt:

$$E_P = \tau_P \cdot P_{max} \quad (2-6)$$

mit

- $E_P$ : Pulsenergie
- $\tau_P$ : Pulsdauer
- $P_{max}$ : Pulsspitzenleistung

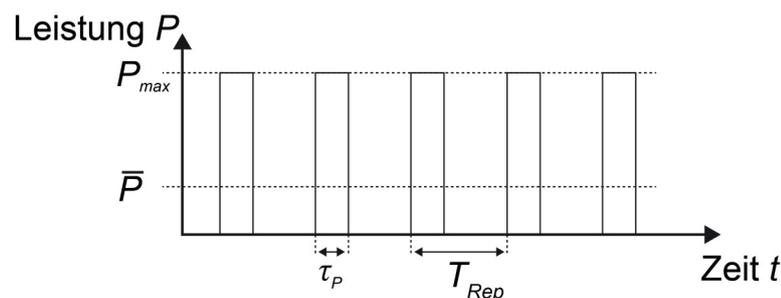


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung des Pulsbetriebs mit Rechteckpulsen

Die zeitliche Abfolge der Pulse wird durch die Repetitionsrate  $f_{Rep}$  oder deren Kehrwert, den zeitlichen Pulsabstand  $T_{Rep}$ , festgelegt. Mittels Formel (2-7) kann aus diesen Werten und der Pulsenergie die mittlere Ausgangsleistung berechnet werden. Da zwischen zwei Pulsen immer ein zeitlicher Bereich ohne emittierte Leistung vorliegt, ist bei der gepulsten Laserstrahlung die mittlere Ausgangsleistung immer geringer als die Pulsspitzenleistung. Es gilt:

$$\bar{P} = E_P \cdot f_{Rep} = E_P \cdot T_{Rep}^{-1} \quad (2-7)$$

mit

$\bar{P}$ : Mittlere Ausgangsleistung

$f_{Rep}$ : Repetitionsrate

$T_{Rep}$ : Zeitlicher Pulsabstand

Bei der Materialbearbeitung mittels gepulster Laserstrahlung müssen verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Über die mittlere Ausgangsleistung  $\bar{P}$  kann die in das Werkstück eingebrachte Energie eingestellt werden. Im Gegensatz zu kontinuierlicher Strahlung haben vor allem die Pulsenergie (vgl. Formel (2-5)) und die Interaktionszeit zwischen der Strahlung und dem Werkstück einen entscheidenden Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis (EICHLER & EICHLER 2010, S. 373).

Beim Einsatz von gepulster Laserstrahlung werden häufig modulierte Pulsformen eingesetzt, bei denen innerhalb eines Pulses verschiedene Leistungsniveaus auftreten. Auf diese Weise kann der zeitliche Ablauf des Energieeintrags in das Werkstück den Anforderungen des Bearbeitungsprozesses angepasst werden, um beispielsweise zunächst Material zu verdampfen und anschließend das Werkstück nachzuwärmen. In Abbildung 2-10 ist ein exemplarischer Pulsverlauf gezeigt. Es sind drei verschiedene Leistungsniveaus ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ) zu erkennen. Zu Beginn des Pulses wird mit dem Niveau  $P_1$  die maximale Pulsleistung erreicht. Nach 20 % der Pulsdauer wird die Leistung auf 60 % der Maximalleistung moduliert ( $P_2$ ). Zuletzt wird nach 60 % der Pulsdauer die Leistung auf das Niveau  $P_3$  mit 20 % der Maximalleistung reduziert.

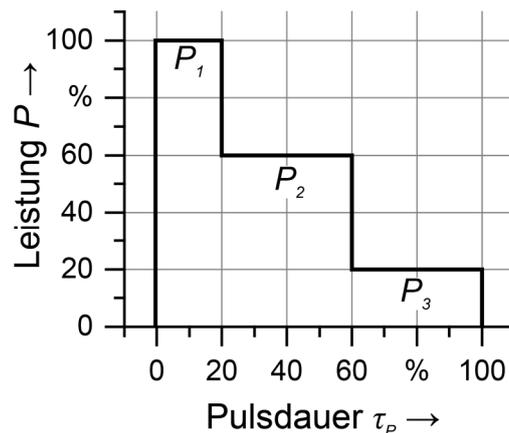


Abbildung 2-10: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines Pulses bei gepulster Laserstrahlung mit modulierter Pulsform

## 2.4 Optimierung mittels evolutionärer Algorithmen

### 2.4.1 Allgemeines

Evolutionäre Algorithmen sind universell einsetzbaren Strategien, um eine Lösung für eine Problemstellung ohne großen Formalisierungs- oder Modellierungsaufwand zu generieren. Damit unterscheidet sich diese Methode von anderen computergestützten Strategien, bei denen auf Grundlage von detailliertem Verständnis der Problemstellung ein effizientes Verfahren zur Lösung entwickelt wird (GERDES ET AL. 2004, S. 2). Der Name dieser Methode bezieht sich auf die aus der Biologie bekannte Evolutionstheorie von Charles Darwin, gemäß der aus der Kombination aus Variation und Selektion von Individuen ein Evolutionsprozess hervorgeht (DARWIN 1859). Die Grundlage der Theorie besagt, dass bestimmte Individuen aufgrund genetischer Variationen besser an ihre Umwelt angepasst sind als andere und daher eine größere Überlebenswahrscheinlichkeit aufweisen (GERDES ET AL. 2004, S. 217). Dieser als Selektionsdruck bezeichnete Effekt führt langfristig zu einer Anpassung der Population an die wirkenden Umweltfaktoren.

Dieses Prinzip lässt sich in vereinfachter Form als Optimierungsverfahren verwenden, sodass Näherungslösungen erzeugt werden können. Die Vorgehensweise von Evolutionären Algorithmen ist dabei in folgende drei Phasen gegliedert.

#### **Initiierung**

In der Initiierung werden die prinzipielle Struktur der Problemlösung und der Lösungsraum (Suchraum) definiert. Hierfür ist in den meisten Fällen eine konkrete Zielfunktion erforderlich, mit deren Hilfe die Elemente des Lösungsraums bewertet werden können. Die Ausgangssituation der Optimierung bildet die Startpopulation, welche aus zufälligen Elementen des Suchraums zusammengesetzt ist. Im weiteren Verlauf werden in diskreten Schritten neue Generationen von möglichen Lösungen erzeugt (GERDES ET AL. 2004, S. 3).

#### **Evolutionszyklus**

Der Evolutionszyklus umfasst den iterativen Prozess einer fortschreitenden Auswahl (Selektion) und Variation von Individuen. Basierend auf der Bewertung hinsichtlich der Zielfunktion werden die am wenigsten geeigneten Lösungen verworfen und mittels Rekombination und Mutation neue Individuen generiert. Auf diese Weise kann eine fortschreitende Anpassung der gesamten Population an die gewählte Problemstellung ermöglicht werden (KELLENBRINK & HELBER 2014, S. 76).

## Abschluss

Der Algorithmus wird unter bestimmten Kriterien abgebrochen. Als solche Kriterien können z. B. eine hinreichend gute Lösung, eine maximale Anzahl von Generationen oder eine Konvergenz der Individuen zur Anwendung kommen. Nach der Beendigung des Verfahrens wird das Individuum mit der besten Bewertung als Ergebnis ausgewählt.

### 2.4.2 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen sind eine weitverbreitete Art von Evolutionären Algorithmen. Der Genetische Algorithmus unterscheidet sich von anderen Evolutionären Algorithmen durch die Rekombination als primären Suchoperator und durch eine wahrscheinlichkeitsbasierte Auswahl an Individuen als Eltern für die Rekombination (WEICKER 2007, S. 128). Ein weiteres Merkmal des Genetischen Algorithmus ist die binäre Kodierung von Genen (HARZHEIM 2014, S.273). Die Mutation stellt meist nur einen Hintergrundoperator dar, welcher mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit zur Anwendung kommt, um die Erreichbarkeit aller Punkte im Lösungsraum über eine Grunddiversität der Population zu garantieren. Die stochastische Selektion ermöglicht auch Individuen mit einer geringen Bewertung hinsichtlich der Zielfunktion eine Wahrscheinlichkeit zur Reproduktion (WEICKER 2007, S. 128, 131). In Abbildung 2-11 ist die Grundstruktur eines Genetischen Algorithmus visualisiert. Die wesentlichen Begriffe sind aus der Biologie abgeleitet und werden zum besseren Verständnis in den nächsten Absätzen näher erläutert.

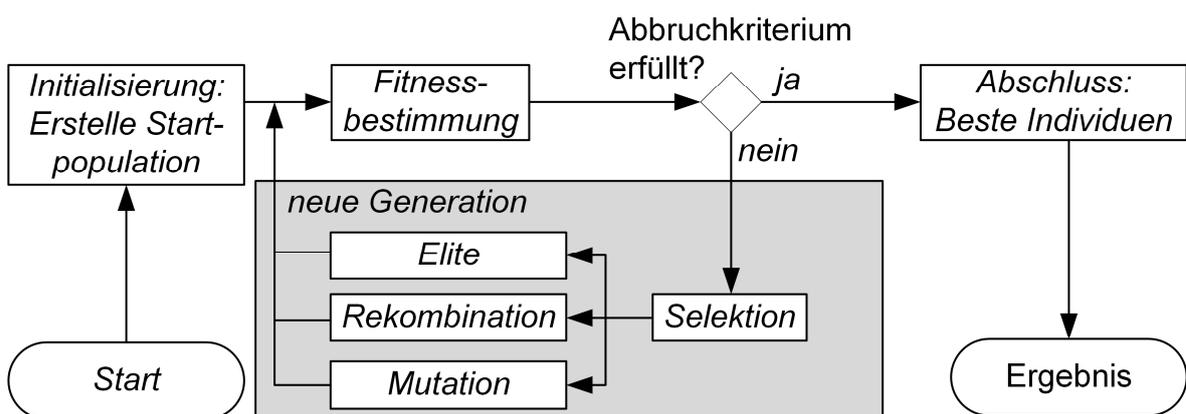


Abbildung 2-11: Grundstruktur von Genetischen Algorithmen (in Anlehnung an POHLHEIM 2000, S. 9)

### **Individuum**

Die *Individuen* sind die möglichen Lösungen für das Optimierungsproblem. Ein Individuum besteht aus einer Zeichenkette (engl. *String*) der gewählten Repräsentationsform. Je nach Kodierung wird die Zeichenkette als binärer, ganzzahliger oder reeller Vektor einer fest definierten Länge  $l$  dargestellt. In der ursprünglichen Form werden binäre Kodierungen verwendet. Die einzelnen Variablen innerhalb der Zeichenkette werden *Gene* genannt. Sie stellen die Erbinformationen des Individuums dar. Die konkrete Ausprägung eines Gens mit einem Wert wird *Allel* bezeichnet. Der Genpool setzt sich aus der Gesamtheit aller *Allele* in einer Population zusammen. (WEICKER 2007, S. 8)

### **Population und Generation**

Die *Population* ist eine Menge von Individuen. Populationen haben in der Regel eine endliche Größe  $N_{Pop}$ . Zu Beginn der Optimierung wird eine initiale Population, auch Start- oder Anfangspopulation genannt, generiert. Diese Population umfasst eine definierte Anzahl von Elementen des möglichen Lösungsraums, welche meist zufällig erstellt werden. Die Startpopulation sollte aus möglichst unterschiedlichen Individuen bestehen, wobei der Grad der Verschiedenheit als Diversität bezeichnet wird.

Wie auch in der biologischen Evolution, bezeichnet eine *Generation* die Population zu einem bestimmten Zeitpunkt. Jeder Evolutionsschritt innerhalb des Algorithmus entspricht einer Generation, wobei diese durch sukzessive Anwendung von genetischen Operatoren durch eine neue Generation ersetzt wird. Im Idealfall stellt jede Folgegeneration im Mittel eine bessere Lösung für das Problem dar. (WEICKER 2007, S. 62, KRUSE ET AL. 2015, S. 159)

### **Fitness**

Der Begriff *Fitness* bezeichnet die Güte und Tauglichkeit eines einzelnen Individuums als Lösung für das Problem und wird in Relation zur Zielfunktion berechnet. Die Zielfunktion wird demnach als Minimierungs- oder Maximierungsproblem formuliert. Die Fitness dient als zentrales Auswahlkriterium für die Individuen der Reproduktion (Elternpaare).

Sobald bei der Bewertung eines Individuums mehrere Faktoren berücksichtigt werden müssen, bedarf es einer mehrkriteriellen Fitnesszuweisung. Hierfür werden mehrere Einzelzielfunktionen formuliert, welche gegebenenfalls in Konkurrenz

zueinander stehen. Für  $k$  verschiedene Optimierungskriterien werden daher  $k$  Zielfunktionen benötigt. Es stehen zwei verschiedene Ansätze für die Mehrkriterienoptimierung zur Verfügung.

Bei der ersten Möglichkeit werden die einzelnen Zielfunktionen  $f_i$  zu einer Gesamtzielfunktion  $Z_F$  summiert. Zusätzlich kann eine Gewichtung  $w_i$  der Einzelkriterien erfolgen (ZITZLER ET AL. 2000):

$$Z_F = \sum_{i=1}^k w_i f_i \quad (2-8)$$

mit

- $Z_F$ : Gesamtzielfunktion
- $w_i$ : Gewichtungsfaktoren
- $f_i$ : Zielfunktionen

Die Absolutwerte der Gewichtungsfaktoren  $w_i$  bestimmen den Einfluss der einzelnen Zielfunktionen  $f_i$  auf die Optimierung. Wenn die verschiedenen Werte einer Zielfunktion  $f_i$  nur geringe Schwankungen aufweisen, werden diese auch bei einer hohen Gewichtung lediglich einen kleinen Einfluss auf die Optimierung haben (GERDES ET AL. 2004, S. 9).

Für den zweiten Ansatz werden, anstelle der Gesamtzielfunktion, die einzelnen Zielfunktionen unverändert einzeln betrachtet. Es wird nach einer Pareto-optimalen Lösung gesucht, sodass der Wert einer Zielfunktion eines Optimierungskriteriums nicht mehr verbessert werden kann, ohne dass eine oder mehrere Zielfunktionen schlechtere Werte liefern (POHLHEIM 2000, S. 21). Unabhängig von der Wahl des Ansatzes lässt sich anschließend ein mehrkriterieller Rang abbilden. Dieses Vorgehen entspricht der *reihenfolgebasierten Fitnesszuweisung* für einkriterielle Probleme.

Die Definition einer geeigneten Zielfunktion ist von entscheidender Bedeutung für eine erfolgreiche Optimierung und ist daher beim Entwurf von Genetischen Algorithmen eine der zentralen Herausforderungen.

### Selektion

Die *Selektion* ist innerhalb des Optimierungsalgorithmus das Verfahren zur Auswahl der Individuen, welche als Eltern zur weiteren Fortpflanzung zur Verfügung stehen (WEICKER 2007, S. 11). Aus der Population  $N_{Pop}$  werden  $N_E$  Individuen ausgewählt. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass zum einen alle Individuen eine Wahrscheinlichkeit ungleich Null besitzen, ausgewählt zu werden, und zum anderen, dass eine möglichst große Vielfalt an Lösungen erhalten bleibt. Darüber hinaus müssen

die Individuen im Verlauf der Generationen immer weiter zu einer geeigneten Lösung konvergieren (WEICKER 2007, S. 67 ff.). Eine simple Auswahl der besten Individuen innerhalb der Selektion widerspricht demnach dem Erhalt der Vielfalt. Aus diesem Grund wird eine zufällige Auswahl implementiert, deren Selektionswahrscheinlichkeit von der Fitness der Individuen abhängig ist. Ein beispielhaftes Verfahren ist die *fitnessproportionale Selektion*. Hierbei wird die Auswahlwahrscheinlichkeit direkt von der Fitness des Individuums bestimmt. Die Selektion erfolgt auf Basis dieser zugeordneten Wahrscheinlichkeit (KRAMER 2009, S. 32). Ein Nachteil dieses Verfahrens ist die Dominanz von Individuen mit vergleichsweise sehr hoher Fitness. Durch zunehmende Reproduktion dieser Individuen in nachfolgenden Generationen kann die Dominanz noch größer werden. Ist im Gegensatz dazu der Unterschied der Fitness der Individuen nur sehr gering, werden bessere Lösungen nicht stark genug bevorzugt, sodass nur ein sehr geringer Selektionsdruck auftritt (BAKER 1985).

### **Elitismus**

Die Verfahren zur Selektion können dazu führen, dass auch das Individuum mit der besten Fitness innerhalb einer Generation durch Mutation oder Rekombination verändert wird. Es kann daher vorkommen, dass die besten Lösungen durch Nachkommen ersetzt werden, deren Fitness schlechter ist (POHLHEIM 2000, S. 58). Um sicherzustellen, dass sich die Fitness des besten Individuums innerhalb der Evolutionszyklen nicht verschlechtert, wird der Elitismus eingesetzt. Hierfür werden eine Anzahl von  $N_{Elite}$  Individuen mit der besten Fitness unverändert in die nächste Generation übernommen. Auf diese Weise können die besten Lösungen konserviert werden (KRUSE ET AL. 2015, S. 205).

### **Rekombination**

Der Begriff *Rekombination* bezeichnet einen Vorgang, bei dem aus zwei oder mehr Eltern-Individuen neue Kind-Individuen erzeugt werden. Dieser Operator stellt den wichtigsten Suchoperator von Genetischen Algorithmen dar.

Die *diskrete Rekombination* beschreibt den direkten Austausch von Genen zwischen den Eltern zur Erzeugung der Nachkommen. In Abbildung 2-12 ist der Genaustausch von zwei an der Rekombination beteiligten Eltern-Individuen visualisiert. Sie spannen durch ihre Variablenwerte ein Rechteck auf, wobei Nachkommen nur Werte der Eckpunkte annehmen können. Die Eltern haben dieselbe Wahrscheinlichkeit, Erbinformationen weiterzugeben (MÜHLENBEIN & SCHLIERKAMP-VOOSEN 1993).

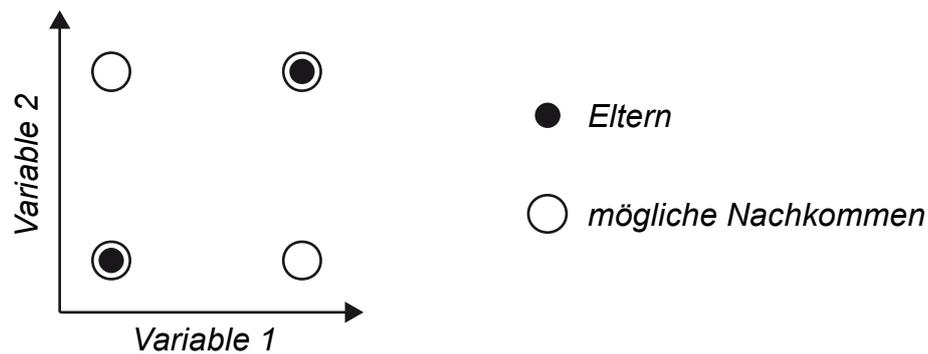


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der diskreten Rekombination am Beispiel von zwei Eltern (nach POHLHEIM 2000, S. 35)

### Mutation

Während durch Rekombination keine neuartigen Lösungsansätze generiert werden können, sondern nur bestehende Variablen neu zusammengestellt werden, stellt die Mutation die Grundlage für die Veränderung der Individuen innerhalb des Evolutionszyklus dar (WEICKER 2007, S. 10). Durch die Mutation erfolgen zufällige Veränderungen der Individuen über eine festgelegte Mutationswahrscheinlichkeit  $R_M$ . Diese legt fest, wie viele Variablen eines Individuums verändert werden. In der Regel ist dieser Wert sehr gering (ca.  $1/\text{Anzahl der Gene}$ ) (POHLHEIM 2000, S. 180).

Bei Genetischen Algorithmen hat die Mutation nur einen geringen Einfluss auf die Veränderung der Population. Dennoch gewährleistet die Mutation eine gewisse Inhomogenität und Divergenz während der Optimierung. Dadurch wird eine frühzeitige Konvergenz verhindert und sichergestellt, dass alle Elemente des Lösungsraums erreicht werden können.

Bestehen die Gene aus reellen Variablen, wird die Mutation als Addition zufälliger Werte implementiert. Entscheidend sind hierbei die Mutationswahrscheinlichkeit  $R_M$  und die Größe der Veränderung des Gens. In Abbildung 2-13 ist die Veränderung einer Variablen durch Mutation veranschaulicht. Während der Wert  $s$  die Richtung der Mutation vorgibt, beschreibt der Parameter  $r$  die maximale Größe des Mutationsschrittes. Prinzipiell sollte die Mutation so parametrisiert werden, dass mit einer hohen Wahrscheinlichkeit Individuen erzeugt werden, welche dem Ausgangsindividuum sehr ähnlich sind, und nur sehr wenige Individuen entstehen, welche starke Abweichungen davon aufweisen. (POHLHEIM 2000, S. 48)

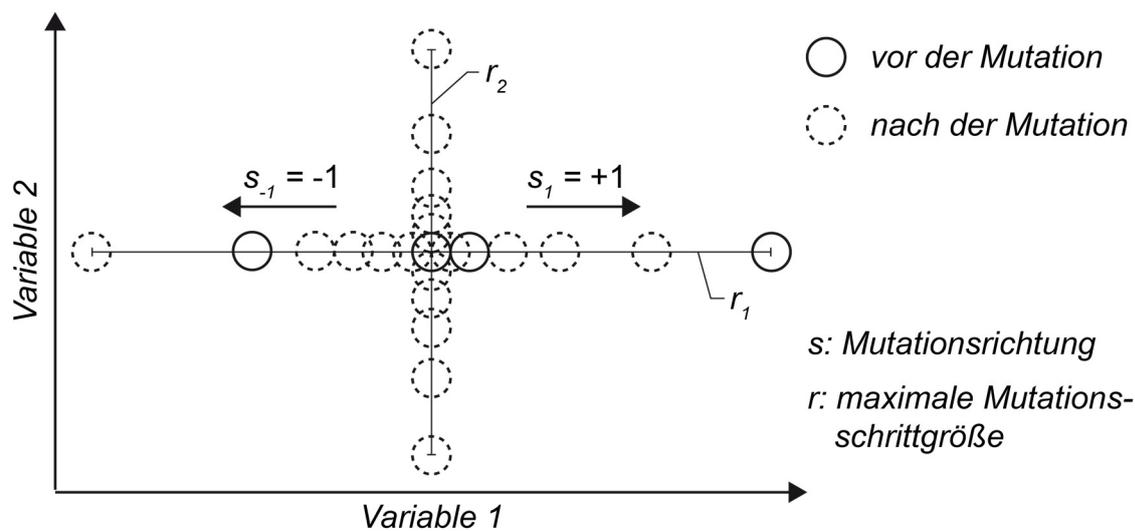


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Mutation anhand möglicher Positionen eines Individuums nach der Mutation reeller oder ganzzahliger Variablen (nach POHLHEIM 2000, S. 48)

### Reinsertion und Reproduktion

Nachdem die Nachkommen durch Rekombination und Mutation erzeugt und mittels einer Zielfunktion bewertet wurden, muss entschieden werden, wie viele und welche Nachkommen in die Population eingefügt und welche Individuen der bestehenden Population ersetzt werden sollen. Der dafür grundlegende Parameter ist die Wiedereinführtrate  $R_W$ , welche definiert, wie groß der Anteil der Population ist, der durch neue Nachkommen ersetzt wird. Ein Wert von  $R_W = 1,0$  hat zur Folge, dass alle Individuen durch Nachkommen ersetzt werden. Ist der Wert kleiner als eins, werden weniger Nachkommen als Individuen in die Population eingefügt. Die Auswahl der zu ersetzenden Individuen kann entweder zufällig erfolgen oder an die Fitness gekoppelt werden. Letzteres entspricht dem Prinzip des *Elitismus*. (POHLHEIM 2000, S. 57 ff.)

## 2.5 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen zur elektrischen Verbindung von Batteriezellen dargelegt. Ausgehend vom grundsätzlichen Design einer Lithium-Ionen-Zelle wurde der Aufbau eines Energiespeichersystems beschrieben. Anhand eines Zellverbunds, in dem die Zellen parallel verschaltet werden, wurde der Zellverbinder vorgestellt. Die Anforderungen an diesen Zellverbinder konnten aus den notwendigen Randbedingungen der elektrischen Verbindung dieser Zellen übertragen bzw. abgeleitet werden. Darüber hinaus wurden die besonderen Herausforderungen bei der Kontaktierung von zylindrischen Zellen

diskutiert und die produktionsseitigen sowie funktionellen Anforderungen beschrieben. Zum Verständnis des für die Kontaktierung eingesetzten gepulsten Laserstrahlschweißprozesses wurden zunächst die Grundlagen der Strahlführung und der Strahl-Stoff-Wechselwirkung dargelegt. Anschließend wurden die besonderen Eigenschaften der gepulsten Laserstrahlung vorgestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Optimierung der Topologie des Zellverbinders beschrieben. Die hierfür eingesetzte Optimierungsmethode ist der Genetische Algorithmus, dessen grundsätzlicher Aufbau im letzten Abschnitt dieses Kapitels vorgestellt wurde.



## 3 Stand der Wissenschaft und Technik

### 3.1 Allgemeines

In Abschnitt 2.2.3 wurde der Aufbau von Energiespeichern erläutert. Die einzelnen Batteriezellen werden in einer Parallel- oder Serienschaltung miteinander verbunden, um die gewünschte Speicherkapazität und -leistung zu erreichen. Hierfür können verschiedene Verfahren eingesetzt werden. In diesem Kapitel werden abgeschlossene Untersuchungen zur elektrischen Kontaktierung von zylindrischen Lithium-Ionen-Zellen diskutiert. Weiterhin werden Methoden zur Optimierung von Topologien und elektrischen Kontakten vorgestellt.

In Abschnitt 3.2 wird der Stand der Wissenschaft und Technik zur elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen dargelegt. Zunächst wird dazu in Abschnitt 3.2.1 ein Überblick über relevante Fügeverfahren gegeben. Da der Schwerpunkt in der vorliegenden Arbeit auf zylindrischen Batteriezellen liegt, finden die Verfahren *Widerstandspunktschweißen*, *Ultraschallschweißen*, *Drahtbonden* und *Laserstrahlschweißen* besondere Beachtung. Ausgehend von dieser Gegenüberstellung werden in Abschnitt 3.2.2 Veröffentlichungen beschrieben, welche speziell die laserbasierte Kontaktierung von Batteriezellen behandeln. Anschließend werden in Abschnitt 3.2.3 Strategien zum gepulsten Laserstrahlschweißen vorgestellt, um dünne Bleche zu verbinden.

Für die in Kapitel 7 beschriebene Optimierungsmethode sind zwei verschiedene Themenbereiche als Ausgangssituation relevant: Zunächst wird in Abschnitt 3.3 eine simulationsgestützte Methode präsentiert, welche eine optimierte Auslegung der Kontaktgeometrie bei der elektrischen Verbindung von Zellen ermöglicht. Darüber hinaus werden in Abschnitt 3.4 Arbeiten zur Optimierung von Topologien erläutert.

Abschließend werden in Abschnitt 3.5 die wichtigsten Ergebnisse der relevanten Arbeiten zusammengefasst und davon ausgehend der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

## **3.2 Elektrische Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen**

### **3.2.1 Relevante Fügeverfahren**

In LI ET AL. (2016, S. 8-21) wird ein Überblick über die industriell relevanten Verfahren zur Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen für die Herstellung von Energiespeichersystemen gegeben. Diese sind das Ultraschallschweißen, das Widerstandspunktschweißen, das Drahtbonden und das Laserstrahlschweißen. Im Folgenden werden die Verfahren vorgestellt und deren Vor- sowie Nachteile diskutiert. Eine Zusammenfassung der Eigenschaften findet sich in Tabelle 3-1.

#### **Ultraschallschweißen**

Das Ultraschallschweißen von Metallen ist ein Verfahren, bei dem eine hochfrequente (mehr als 20 kHz) Ultraschallanregung verwendet wird, um eine laterale oder transversale Relativbewegung zwischen den Fügepartnern zu erzeugen. Die alternierenden, hochfrequenten Scherkräfte induzieren eine Oberflächenreibung, die durch die Erwärmung des Werkstoffs zur Erzeugung einer Schweißnaht führt. Das Ultraschallschweißen kann eingesetzt werden, um Metallbleche oder dünne Metallfolien zu verbinden. (ZHANG & LI 2009)

Das Fügen mittels Ultraschallschweißen findet im festen Zustand, also bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes statt. Es eignet sich sehr gut, um eine große Anzahl an Lagen von verschiedenartigen, hochleitfähigen Metallen (z. B. Aluminium und Kupfer) zu fügen. Dadurch ergibt sich ein großes Potenzial für das Kontaktieren von Ableitern an die Zellen. (SHAWN LEE ET AL. 2013)

Weitere Vorteile sind eine sehr geringe Wärmeeinflusszone und eine sehr kleine Verbindungsgrenzfläche. Letztere verringert metallurgische Defekte, wie z. B. Porosität und Heißrisse, die in Schmelzschweißungen auftreten können. (LI ET AL. 2016, S. 21)

Da die Ultraschallvibration eine mechanische Welle darstellt, die sich im Werkstoff ausbreitet, können durch den Schweißprozess Spannungen im Werkstück entstehen (CHOI ET AL. 2012). Weitere Nachteile sind die Begrenzung der Fugendicke (< 3 mm), die Empfindlichkeit gegenüber Prozess- und Produktvariationen und die Herausforderungen beim Fügen von hochfesten oder sehr harten Werkstoffen. Insbesondere bei der Verbindung von Flachzellen wird das Ultraschallschweißen als das bevorzugte Verfahren angesehen. (LEE ET AL 2010.)

### **Widerstandspunktschweißen**

Beim Widerstandspunktschweißen wird der Kontaktwiderstand an der Grenzfläche zwischen zwei Fügepartnern ausgenutzt, um an dieser Stelle durch den elektrischen Strom eine Erwärmung zu erzeugen. An der Grenzfläche wird lokal die Schmelztemperatur überschritten und es bildet sich eine Schweißlinse aus. Die Elektroden des Werkzeugs, die den elektrischen Strom applizieren, sind während des Schweißprozesses in direktem Kontakt mit den Fügepartnern und üben eine Anpresskraft auf diese aus. (ZHANG 2017)

Das Widerstandspunktschweißen ist ein Verfahren mit einer relativ kleinen Prozesszeit und es ist sehr einfach zu automatisieren. Es hat einen großen Anwendungsbereich in der Automobil-, der Elektronik- und der Schwerindustrie, insbesondere für das Verschweißen von Stahl. (LEE ET AL. 2010)

Das Verfahren wird schon seit vielen Jahren zur Kontaktierung von Batteriezellen eingesetzt, wobei hoch elektrisch und hoch thermisch leitfähige Werkstoffe (z. B. Kupfer und Aluminium) nicht mit konventionellem Widerstandspunktschweißen gefügt werden können (ZHOU ET AL. 2000). Bei diesen Werkstoffgruppen müssten sehr hohe elektrische Ströme (10–100 kA) in einer kurzen Zeit (ca. 10 ms) appliziert werden (ZHOU ET AL. 2001).

Da das Gehäuse von zylindrischen Zellen aus einem Stahlwerkstoff besteht und da im Vergleich zu anderen Zelltypen geringere elektrische Ströme in diesen Zellen fließen, wird das Widerstandspunktschweißen häufig zur Verbindung von zylindrischen Zellen eingesetzt. (LEE ET AL. 2010)

### **Laserstrahlschweißen**

Die Grundlagen des Laserstrahlschweißens sind in Abschnitt 2.3 erläutert worden. Das Verfahren hat in Bezug auf die Batteriefertigung signifikante Vorteile, wie die geringe Prozesszeit, die hohe Präzision und die kontaktfreie Bearbeitung. Weiterhin ist die resultierende Wärmeeinflusszone aufgrund des lokalen Energieeintrags sehr klein, was Verzüge und Spannungen gering hält. (LI ET AL. 2016, S. 21)

Herausforderungen ergeben sich jedoch durch hohe Reflexionsgrade und durch hohe thermische Leitfähigkeiten häufig eingesetzter Werkstoffe (z. B. bei Aluminium und Kupfer). Außerdem begrenzt die geringe metallurgische Affinität vieler Werkstoffkombinationen den Einsatz dieses Verfahrens, da die intermetallischen Phasen zu einem erhöhten elektrischen Widerstand und zu einer reduzierten mechanischen Festigkeit führen. (LEE ET AL. 2010)

Ein Ansatz zur Begrenzung der intermetallischen Phasen wurde von SOLCHENBACH (2014) vorgestellt. Beim Laser-Diffusionsschweißen im Rahmen jener Dissertationsarbeit wurde nur ein Fügepartner durch die eingesetzte Laserstrahlung aufgeschmolzen, sodass die Phasen sich nur in einem kleinen Bereich in der Grenzfläche ausbildeten. Auf diese Weise konnten die elektrische Leitfähigkeit und die mechanische Festigkeit der Verbindung erhöht werden. (SOLCHENBACH 2014, SCHMALEN & PLAPPER 2016)

#### **Drahtbonden**

Das Drahtbonden ist ein Schweißverfahren für die Mikrosystemtechnik, bei dem ein automatisch zugeführter Draht mittels Ultraschallschweißen zunächst auf ein erstes Substrat und anschließend auf ein oder mehrere weitere Substrate gefügt wird. Der Drahtdurchmesser liegt in einem Bereich von 0,01 mm bis 0,50 mm und besteht in der Regel aus den Werkstoffgruppen Silber, Kupfer oder Aluminium. Aufgrund der Flexibilität und geringer Kosten wird das Verfahren häufig in der Mikroelektronik eingesetzt. (LI ET AL. 2016, S. 18 ff.)

Für den Einsatz in Energiespeichersystemen müssen die Drahtstärken entsprechend der zu übertragenden Stromstärke angepasst werden. Im Tesla Model S werden beispielsweise zur Verbindung der zylindrischen 18650-Zellen Aluminiumdrähte mit einem Durchmesser von 0,381 mm eingesetzt. (SCHUTZRECHT US7923144 B2)

Zur Steigerung der Prozessstabilität und zum Schweißen größerer Drahtquerschnitte wurde ein laserbasiertes Drahtbonden vorgestellt. Hierbei wurde die Schweißnaht mittels hochbrillanter Laserstrahlung erzeugt, wobei eine Strahloszillation zur Vergrößerung der Anbindungsfläche und zur Regulierung der Einschweißtiefe angewendet wurde. (MEHLMANN ET AL. 2014A)

*Tabelle 3-1: Übersicht verschiedener Fügeverfahren zur Batteriekontaktierung und deren Vor- sowie Nachteile (nach LI ET AL. 2016, S. 21)*

Fügeprozess	Eigenschaften	
Ultraschall-schweißen	Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• minimale intermetallische Phasen</li> <li>• geringe Wärmeeinflusszone</li> <li>• geeignet für elektrisch hochleitfähige Werkstoffe</li> <li>• geeignet für dünne Folien und Drähte</li> <li>• geeignet für Mehrschicht-Anordnungen</li> </ul>
	Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• doppelseitiger Zugang erforderlich</li> <li>• Risiko einer schweren Rändelperforation</li> <li>• verursacht strukturelle Vibrationen</li> <li>• Obergrenze der Schweißnahtdicke</li> <li>• nicht geeignet für harte Werkstoffe</li> </ul>
Widerstandspunkt-schweißen	Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einseitiges Schweißen möglich</li> <li>• etablierte, beherrschbare Technologie</li> <li>• geringe Investitionskosten</li> </ul>
	Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Wärmeeinflusszone</li> <li>• intermetallische Phasen bei ungleichen Werkstoffen</li> <li>• elektr. hochleitfähige Werkstoffe schwer schweißbar</li> <li>• Mehrschicht-Anordnungen schwer schweißbar</li> <li>• große Schweißnähte schwer herstellbar</li> <li>• Verschleiß der Elektroden</li> </ul>
Laserstrahl-schweißen	Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• relativ kleine Wärmeeinflusszone</li> <li>• einseitiges, kontaktloses Schweißen</li> <li>• hoher Durchsatz</li> </ul>
	Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• intermetallische Phasen bei ungleichen Werkstoffen</li> <li>• Porosität und Heißrisse</li> <li>• erfordert sehr präzise Spannsituation</li> <li>• hohe Investitionskosten</li> </ul>
Drahtbonden	Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• minimale intermetallische Phasen</li> <li>• geringe Wärmeeinflusszone</li> <li>• geeignet für elektrisch hochleitfähige Werkstoffe</li> <li>• einseitiges Schweißen</li> <li>• integrierte Haftfestigkeitsprüfung</li> </ul>
	Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• begrenzte Stromstärke durch limitierte Drahtdicke</li> <li>• nicht geeignet für harte Werkstoffe</li> <li>• steifes Substrat erforderlich</li> </ul>

#### **Vergleich relevanter Fügeverfahren**

Ein Vergleich der drei am häufigsten eingesetzten Verfahren zur Kontaktierung von Rundzellen wurde von BRAND ET AL. (2015) in einer Studie durchgeführt. Das Ultraschallschweißen, das Widerstandspunktschweißen sowie das Laserstrahlschweißen wurden in Bezug auf den resultierenden elektrischen Widerstand und die Scherzugfestigkeit der verschweißten Metallbleche untersucht. Außerdem wurde die Temperatur während des Kontaktierungsprozesses von zylindrischen Zellen mittels Thermografie gemessen. Als Laserstrahlquelle wurde ein kontinuierlich emittierender Single-Mode-Faserlaser mit einer maximalen Leistung von 3 kW und einer Wellenlänge von 1070 nm eingesetzt. Die Vermessung der Verbindungseigenschaften wurde an zwei im Überlappstoß verschweißten Blechen aus dem Werkstoff Messing (CuZn37) mit einer Dicke von 0,2 mm durchgeführt. In Abbildung 3-1 sind die Ergebnisse des elektrischen Widerstands und der Scherzugfestigkeit dargestellt. Variiert wurde beim Widerstandspunktschweißen die Anzahl der Schweißpunkte, beim Ultraschallschweißen die Fläche der Sonotrode und beim Laserstrahlschweißen die Anzahl und die Länge der Schweißnähte.

Für das Widerstandspunktschweißen wurden, entsprechend der Darstellung in Abbildung 3-1, drei verschiedene Konfigurationen für die Anzahl der Schweißpunkte untersucht (4 Punkte, 8 Punkte, 12 Punkte). Es konnte festgestellt werden, dass die Scherzugfestigkeit mit zunehmender Anzahl der Schweißpunkte ansteigt, während der elektrische Widerstand bei gesteigerter Schweißpunktanzahl abnimmt. Bei einem Anstieg von 8 auf 12 Schweißpunkte konnte allerdings innerhalb der Standardabweichung keine Veränderung festgestellt werden.

Die Untersuchung des Ultraschallschweißens wurde mit vier verschiedenen Sonotroden mit jeweils unterschiedlichen Flächen durchgeführt (vgl. Abbildung 3-1). Für die Scherzugfestigkeit konnte ein deutlicher Anstieg bei einer Vergrößerung der Sonotrodenfläche von  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  auf  $6,5 \times 10,5 \text{ mm}^2$  festgestellt werden. Bei einer weiteren Vergrößerung der Fläche auf  $13 \times 13 \text{ mm}^2$  wiesen die Messergebnisse keine höheren Werte auf. Im Gegensatz dazu konnte der elektrische Widerstand mit einer Vergrößerung der Sonotrode immer weiter reduziert werden.

In Abbildung 3-1 sind die drei variierten Schweißstrategien für das Laserstrahlschweißen und deren Ergebnisse gezeigt. Untersucht wurden vier einzelne Steppnähte mit einer Länge von 2 mm sowie jeweils zwei Schweißnähte mit einer Länge von 13,5 mm, mit und ohne eine dem Vorschub überlagerte Strahloszillation. Die Erhöhung der Anbindungsfläche in Form von einer verlängerten Schweißnaht führte

zu einer erhöhten Scherzugfestigkeit sowie zu einem verringerten elektrischen Widerstand. Die Anwendung der Strahloszillation hatte keine Veränderung des elektrischen Widerstands zur Folge. Allerdings konnte die Scherzugfestigkeit geringfügig verbessert werden.

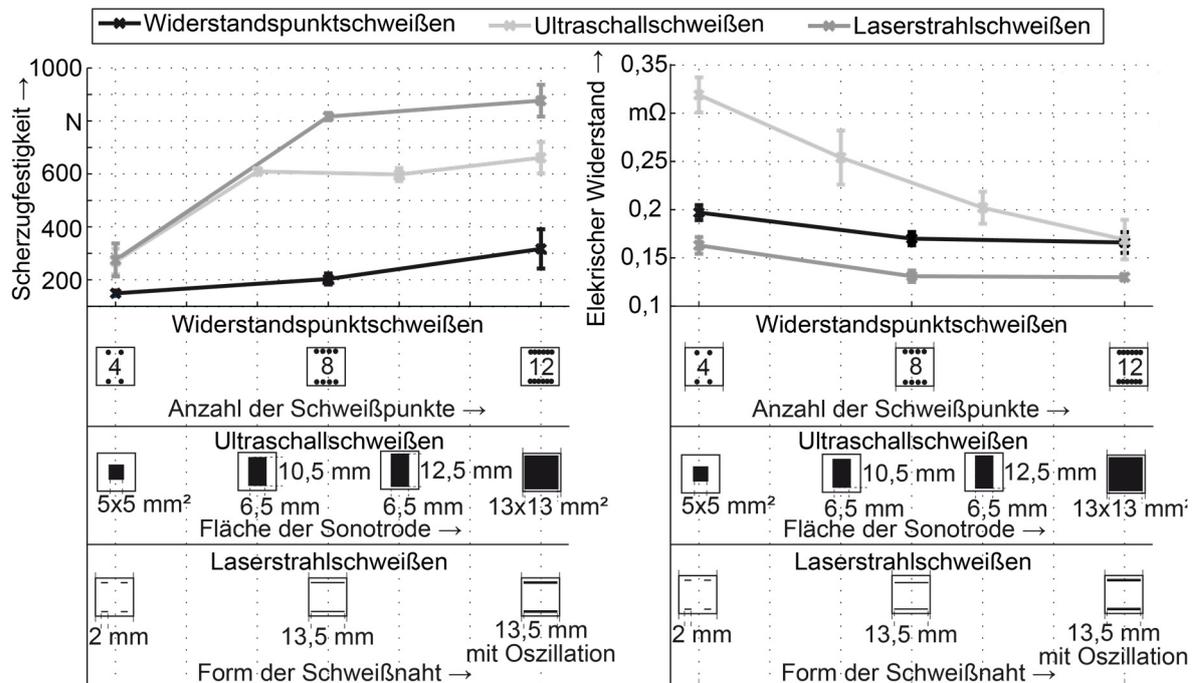


Abbildung 3-1: Ergebnisse der Scherzugfestigkeit (links) und des elektrischen Widerstands (rechts) von verschweißten Blechen aus Messing (CuZn37) mit einer Dicke von 0,2 mm; verwendete Verfahren: Widerstandspunktschweißen, Ultraschallschweißen und Laserstrahlschweißen (nach: BRAND ET AL. 2015)

Die Vermessung der Temperatur während des Schweißprozesses erfolgte bei BRAND ET AL. (2015) mittels Thermografie auf dem Zellgehäuse jeweils am negativen Zellpol neben dem Ableiterblech sowie an der Gehäusesseite der Batteriezelle. Die Temperaturen am Zellpol sind aufgrund der geringeren Entfernung zur Prozesszone für jedes Verfahren größer als auf der Gehäusesseite. Während des Ultraschallschweißens konnten die höchsten Temperaturen gemessen werden, wohingegen beim Widerstandspunktschweißen die niedrigsten Temperaturen festgestellt wurden. Die an der Gehäusesseite gemessenen Temperaturen überschreiten jedoch in keinem Fall die maximal zulässigen Werte.

Der Vergleich der drei Verfahren zeigte, dass die Verbindungen mit dem kleinsten elektrischen Widerstand, wie auch mit der höchsten Scherzugfestigkeit, mittels Laserstrahlung hergestellt wurden. BRAND ET AL. (2015) weisen darauf hin, dass aufgrund der freien Gestaltung der Anbindungsfläche bei der Lasermaterialbearbeitung

die am besten geeignete Anbindungsgeometrie realisiert werden konnte. In Tabelle 3-2 sind jeweils die Ergebnisse mit der größten Anbindungsfläche für alle Verfahren aufgelistet.

*Tabelle 3-2: Vergleich der Ergebnisse mit der größten Anbindungsfläche für die Verfahren Widerstandspunktschweißen, Ultraschallschweißen und Laserstrahlschweißen; Werkstoff CuZn32; Messung der Temperatur beim Verschweißen von 26650-Zellhüllen mittels Thermografie (nach BRAND ET AL. 2015).*

Messwert	Widerstands- punktschweißen	Ultraschall- schweißen	Laserstrahl- schweißen
min. elektrischer Widerstand	0,167 mΩ	0,169 mΩ	0,130 mΩ
max. mechanische Zugfestigkeit	316,78 N	661,32 N	876,80 N
max. Temperatur am Zellpol	31,0 °C	110,7 °C	86,8 °C
max. Temperatur am Gehäuse	25,0 °C	55,2 °C	32,5 °C

Die von BRAND ET AL. (2015) erarbeiteten Ergebnisse belegen das hohe Potenzial des Laserstrahlschweißens für die Kontaktierung von zylindrischen Batteriezellen. Da die Schweißnahtgeometrie in weiten Grenzen frei gewählt werden kann und nicht an die Geometrie eines Werkzeugs gebunden ist, können vergleichsweise sehr gute Werte für die mechanische Zugfestigkeit und den elektrischen Widerstand erreicht werden. Der Wärmeeintrag durch den Laserstrahlschweißprozess ist allerdings höher als mittels Widerstandspunktschweißen. Im folgenden Abschnitt werden weitere Arbeiten zur Kontaktierung von Batteriezellen mittels Laserstrahlung vorgestellt.

### 3.2.2 Kontaktierung mittels Laserstrahlung

Erste Untersuchungen zum Einsatz von Laserstrahlung für die Kontaktierung von zylindrischen Lithium-Ionen-Zellen wurden von MEHLMANN ET AL. (2014B) durchgeführt. Verwendet wurde ein Single-Mode-Faserlaser mit einer maximalen Ausgangsleistung von 200 W und einer Wellenlänge von 1075 nm. Vorgeschlagen wurde zusätzlich der Einsatz einer örtlichen Strahloszillation, um die Anbindungsfläche zu vergrößern und ein Durchschweißen zu verhindern. Für die Versuche wurden Zellhüllen aus dem Werkstoff DC04 mit einer Dicke von 0,25 mm sowie Ableiterbleche aus dem Werkstoff Bronze (CuSn6) mit einer Dicke von 0,2 mm verwendet. Die Kontaktierung erfolgte für alle Versuche mit einer 5 mm langen Schweißnaht am

Minuspol der Zelle, indem die Bleche im Überlappstoß verschweißt wurden. Die Qualität der Schweißnaht wurde anhand der Schliffbilder sowie der Scherzugfestigkeit und des elektrischen Widerstandes der Verbindung bewertet. Zusätzlich wurde die Verbindung einer thermischen Alterung mit 60 Temperaturzyklen von  $-10\text{ °C}$  bis  $60\text{ °C}$  und einer Dauer von jeweils 73,33 min unterzogen.

Es wurden Laserleistungen zwischen 135 W und 187 W sowie Schweißgeschwindigkeiten von 90 mm/s und 110 mm/s untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die Linienenergie das entscheidende Kriterium ist, um eine geeignete Einschweißtiefe zu erreichen. Ein Wert von 1,5 J/mm hat hierbei zu einer ausreichenden Einschweißtiefe ohne Durchschweißen geführt. Weiterhin konnte eine positive Abhängigkeit zwischen der Amplitude der Strahloszillation und der resultierenden Scherzugfestigkeit festgestellt werden. Während die Oszillationsfrequenz konstant bei 1 kHz lag, wurde die Amplitude der Oszillation zwischen 0 mm und 1,5 mm variiert. Aus der Messung des elektrischen Widerstands konnte aufgrund von hohen Schwankungen keine Erkenntnis gewonnen werden. Auch die Messwerte nach der Alterung der Proben zeigten keine signifikanten Veränderungen in Bezug auf die initialen Werte. Zusammenfassend konnte die Eignung von Laserstrahlung für die Kontaktierung von zylindrischen Lithium-Ionen-Zellen nachgewiesen werden. Insbesondere die Strahloszillation wurde als geeignetes Mittel hervorgehoben, um ein unbeabsichtigtes und für die Zelle schädliches Durchschweißen zu verhindern. (MEHLMANN ET AL. 2014B)

Auf diesen Ergebnissen aufbauend veröffentlichten HEINEN ET AL. (2017) ein Verfahren zur einseitigen Kontaktierung der zylindrischen Zellen. Die Verbindung am negativen Pol der Zelle wurde auf der Bördelnaht neben dem Zelldeckel appliziert. Aufgrund eines neuartigen Kühlkonzepts der Zellen, bei welchem ein flüssiges Kühlmittel eingesetzt wird, wurde für die Schweißnaht neben dem elektrischen Widerstand auch die Dichtigkeit der Naht als Zielgröße definiert. Auch HEINEN ET AL. (2017) setzten einen Single-Mode-Faserlaser und eine dem Vorschub überlagerte Strahloszillation ein. Die Strahlquelle hatte eine maximale Ausgangsleistung von 400 W und eine Wellenlänge von 1080 nm. Um die Anbindungsfläche weiter zu erhöhen, wurde die Amplitude der Oszillation auf 0,4 mm bis 0,6 mm mit einer konstanten Frequenz von 700 Hz erhöht. Gleichzeitig musste auch die Linienenergie auf 3,0 J/mm bis 3,2 J/mm gesteigert werden, um eine ausreichende Einschweißtiefe zu realisieren. Die Schweißnaht wurde in dieser Untersuchung anhand der Schliffbilder, einer Messung des elektrischen Widerstands und eines Dichtigkeitstests mit Luft als Medium bewertet.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass aufgrund von vermehrtem Auftreten von Schweißdefekten bei einer hohen Linienenergie ein Wert von 3,0 J/mm zu bevorzugen ist. Als geeignete Prozessparameter konnte eine Laserleistung von 240 W, eine Schweißgeschwindigkeit von 80 mm/s sowie eine Amplitude von 0,4 mm identifiziert werden. Für den elektrischen Widerstand der Verbindung wurde mittels Vier-Punkt-Messung ein Wert von 1,2 m $\Omega$  bestimmt. Mittels eines Dichtigkeitstests konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist, medien-dichte Schweißnähte herzustellen. Allerdings zeigten einige Proben undichte Stellen im Nahtbereich, die auf eine ungenaue Nahtposition zurückzuführen waren.

SCHMIDT ET AL. 2016 wandten den von MEHLMANN ET AL. (2014B) vorgeschlagenen Prozess zur Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen an, um eine umfangreiche Studie zur Eignung verschiedener Metalle als Ableiterwerkstoffe durchzuführen. Untersucht wurden Werkstoffe auf Basis von Aluminium, Kupfer sowie vernickeltem Stahl (DC04) jeweils mit Blechdicken von 0,2 mm. Der elektrische Widerstand und die Scherzugfestigkeit der Verbindung wurden gemessen und bewertet. Außerdem wurden Zellhüllen verschweißt und mit Thermoelementen die prozessbedingte Temperaturänderung im Inneren des Zellgehäuses bestimmt. Als Laserstrahlquelle wurde ein Single-Mode-Faserlaser mit einer maximalen Ausgangsleistung von 3 kW und einer Wellenlänge von 1070 nm eingesetzt. Für alle Werkstoffe wurden Prozessparameter ermittelt, die zu einer konstanten Anbindung ohne Durchschweißen führten. Der niedrigste Wert für den Widerstand wurde für die Kontaktierung mit einem Kupfer-Ableiter gemessen und lag bei 0,75 m $\Omega$ , wobei für die Scherzugfestigkeit ein Wert von 0,45 kN festgestellt wurde. Die höchste Scherzugfestigkeit der Studie konnte bei einer Verbindung mit einem vernickelten Stahl-Ableiter nachgewiesen werden. Für diese damit gleichartige Werkstoffverbindung lag der Wert bei 1,3 kN mit einem elektrischen Widerstand von 0,95 m $\Omega$ . Die Ergebnisse führten zu der Erkenntnis, dass Aluminiumlegierungen keinen geeigneten Ableiterwerkstoff darstellen, da sie weder in Bezug auf den elektrischen Widerstand noch in Bezug auf die Scherzugfestigkeit zu bevorzugen sind. Um die Erwärmung der Zelle zu messen, wurde ein Thermoelement im Inneren eines leeren 26650-Zellgehäuses platziert und die Temperatur während des Kontaktierungsprozesses mit Ableiterblechen aus Kupfer und vernickeltem Stahl aufgezeichnet. Die maximale Temperatur lag für vernickelten Stahl bei 60,5 °C und für Kupfer bei 79,3 °C.

Darüber hinaus hat SCHMIDT (2015) die Eigenschaften lasergeschweißter Kontakte für die Verbindung von prismatischen Zellen untersucht. Gegenstand der Studie war der Vergleich verschiedener Schweißstrategien bezüglich der Anbindungsfläche, der

Temperaturveränderung durch den Schweißprozess und des resultierenden elektrischen Widerstands der Verbindung. Als Werkstoff wurden eine Aluminiumlegierung und eine Kupferlegierung verwendet und als Strahlquelle wurde ein Single-Mode-Faserlaser mit einer maximalen Ausgangsleistung von 3 kW und einer Wellenlänge von 1070 nm eingesetzt. In Abbildung 3-2 ist der Vergleich der maximalen Temperaturänderung und der Anbindungsfläche für die verschiedenen angewendeten Schweißstrategien (*Punkte*, *Steppnaht*, *Linie 1* und *Linie 2*) dargestellt. Die Schweißstrategie *Linie 2* unterschied sich von der Strategie *Linie 1* durch eine überlagerte Strahloszillation. Die Prozessparameter und Schweißstrategien wurden so gewählt, dass der resultierende Widerstand der Verbindung ähnliche Werte ( $k_u \approx 1$ )<sup>4</sup> aufwies.

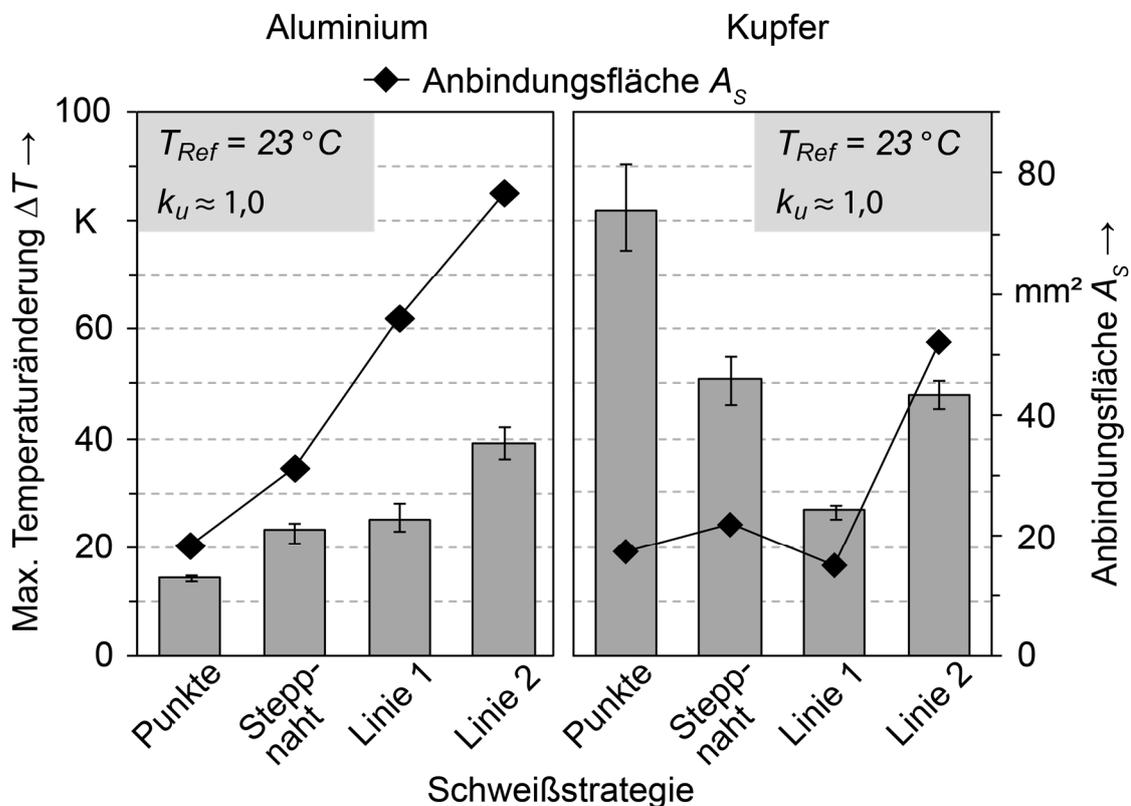


Abbildung 3-2: Vergleich der maximalen Temperaturänderung  $\Delta T$  und der Anbindungsfläche  $A_s$  von Aluminium- (links) und Kupferproben (rechts) für unterschiedliche Schweißstrategien; Linie 2 mit überlagerter Strahloszillation; der resultierende elektrische Widerstand war für alle Proben der abgebildeten Strategien vergleichbar (nach: SCHMIDT 2015, S. 80).

Bei Kupfer lieferten die Strategien *Punkte*, *Steppnaht* und *Linie 1* eine ähnliche Anbindungsfläche, wohingegen die Anwendung der Strategie *Linie 2* in einer erhöhten

<sup>4</sup> Die Kontaktgütemaßzahl ( $k_u$ ) beschreibt den elektrischen Widerstand der Verbindung im Verhältnis zum elektrischen Widerstand des Grundwerkstoffes. Sind die Beträge beider Widerstände identisch, folgt  $k_u = 1$ . Eine ansteigende Kontaktgütemaßzahl entspricht einer Funktionsverschlechterung der Verbindung.

Anbindungsfläche resultierte. Eine Korrelation zur gemessenen maximalen Temperaturänderung konnte nicht festgestellt werden. Die Anwendung der Schweißstrategie *Punkte* hatte die höchste Temperaturänderung zur Folge. Dies konnte auf den hohen Reflexionsgrad von Kupfer zurückgeführt werden. Bei jedem Schweißpunkt musste erneut der Werkstoff aufgeschmolzen werden. Die erhöhten Verluste durch Reflexionen mussten durch eine erhöhte Laserleistung kompensiert werden. Die maximale Temperaturänderung war hingegen bei der Strategie *Steppnaht* geringer und bei der Strategie *Linie 1* am kleinsten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Laserstrahlung über einen vergrößerten Zeitraum in den bereits aufgeschmolzenen Werkstoff einkoppeln konnte und somit weniger Laserleistung benötigt wurde. Die Ergebnisse der Strategie *Linie 2* wiesen hingegen eine maximale Temperaturänderung vergleichbar, zu der Strategie *Steppnaht*, auf. Der erhöhte Energieeintrag war auf die im Vergleich zur Strategie *Linie 1* stark reduzierte Vorschubgeschwindigkeit und damit erhöhte Linienenergie zurückzuführen. (SCHMIDT 2015, S. 80)

Im Gegensatz zu den Ergebnissen mit Kupfer konnte bei Aluminium eine positive Korrelation zwischen der Anbindungsfläche und der maximalen Temperaturänderung festgestellt werden. Mittels Schweißpunkten konnte die geringste Erwärmung erreicht werden (vgl. Abbildung 3-2). Die Strategie *Linie 2* hatte eine größere Anbindungsfläche zur Folge, führte allerdings auch zu einer höheren maximalen Temperaturänderung, da für die vergrößerte Anbindungsfläche mehr Werkstoff aufgeschmolzen werden musste. Da für alle Strategien ein ähnlicher Verbindungswiderstand gemessen wurde, kann gefolgert werden, dass Schweißpunkte bei nicht hochreflektierenden Werkstoffen ein geeigneter Ansatz sind, um bei geringer Temperaturänderung eine vergleichsweise hohe elektrische Leitfähigkeit zu erreichen.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit stellt die Erwärmung des Bauteils aufgrund der geringen Wandstärke des Batteriezellengehäuses eine große Herausforderung für den Kontaktierungsprozess von zylindrischen Rundzellen dar (vgl. Abschnitt 2.2.5). Aus diesem Grund werden im Folgenden Prozessstrategien zum gepulsten Laserstrahlschweißen vorgestellt, mit denen einzelne Schweißpunkte auf der Werkstoffoberfläche appliziert werden können.

#### **3.2.3 Schweißen mittels gepulster Laserstrahlung**

Das Schweißen mittels gepulster Laserstrahlung wird in der Literatur ausführlich beschrieben. Wie in Abschnitt 2.3.4 erläutert, spielt hierbei die Pulsdauer und die zeitliche Modulation des Laserpulses eine entscheidende Rolle für das

Bearbeitungsergebnis. Im Folgenden werden vier verschiedene Pulsformen vorgestellt, welche sich in vorangegangenen Studien als vielversprechend für das Verschweißen von dünnen Belchen herausgestellt haben. Diese sind der *Rechteckpuls*, der *geformte Puls*, der *abfallende Puls* und der *Spike-Puls*. Die Pulsdauer liegt in allen Fällen innerhalb einer Größenordnung um 10 ms. Die Strategien unterscheiden sich in der Laserstrahlführung während der Bearbeitung. Während bei der Applizierung des Spike-Pulses der Laserstrahl für die gesamte Pulsdauer auf einem Punkt auf dem Werkstück positioniert ist, wird dieser bei den anderen Strategien kontinuierlich mit der Vorschubgeschwindigkeit  $v_s$  über das Werkstück geführt. Daraus folgt, dass für den Spike-Puls die Positioniergeschwindigkeiten der Scanneroptik das Bearbeitungsergebnis nicht beeinflussen. Für die anderen Strategien resultiert aus der höheren Vorschubgeschwindigkeit, dass der Laserpuls auf einen größeren Bereich auf dem Werkstück auftrifft. Einen entscheidenden Einfluss der Scanneroptik auf das Bearbeitungsergebnis ist dennoch nur für den abfallenden Puls gegeben, da bei diesem eine relativ hohe Pulsdauer mit einer relativ hohen Vorschubgeschwindigkeit kombiniert wird.

### Rechteckpuls

Der Rechteckpuls ist die einfachste Form der zeitlichen Modulation und kann über die Pulsdauer  $\tau_P$  und das Leistungsniveau  $P_I$ , welches über die gesamte Pulsdauer konstant ist, beschrieben werden (vgl. Abbildung 3-3).

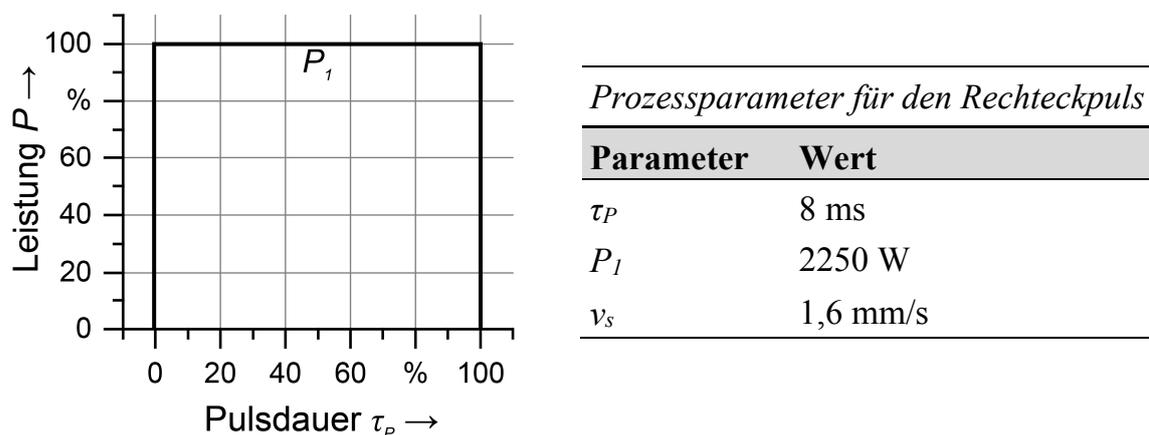


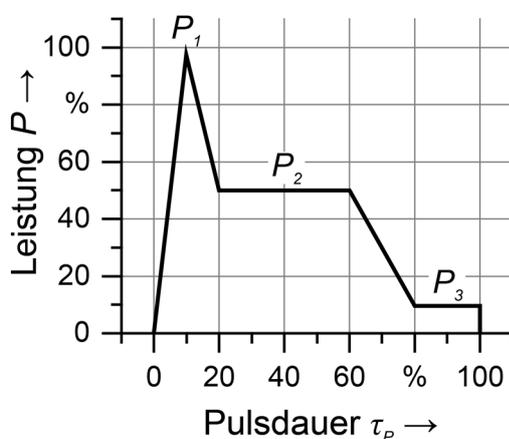
Abbildung 3-3: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines Rechteckpulses und in der Literatur angegebene Prozessparameter zum Schweißen von Stahl (nach: DWORAK 2013)

DWORAK (2013) untersuchte verschiedene Pulsformen für das Verschweißen von metallischen Werkstoffen. Die verwendeten Prozessparameter sind in Abbildung 3-3 angegeben. Der Rechteckpuls erwies sich als nachteilig, da bei diesem zum Erreichen

einer hohen Einschweißtiefe ein hoher Energieeintrag notwendig war. Weiterhin wurde durch die Pulsform der erwärmungsbedingte Anstieg des Absorptionsgrades des Werkstücks nicht berücksichtigt.

### Geformter Puls

Um den Einfluss der größeren Absorption der Laserstrahlung bei höheren Werkstücktemperaturen zu analysieren, wurde von DWORAK (2013) der geformte Puls untersucht. Der Puls sowie die verwendeten Parameter sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Die maximale Laserleistung  $P_1$  wird bei dieser Pulsform bereits kurz nach Pulsbeginn erreicht und ist größer als die maximale Leistung des Rechteckpulses. Auf diese Weise soll eine beschleunigte Erwärmung des Werkstücks erreicht werden. Der Schweißvorgang findet während des zweiten Leistungsniveaus  $P_2$  statt. Anschließend wird die Leistung reduziert, bis das Niveau  $P_3$  erreicht ist. Hiermit sollen die Porenbildung verringert und die Naht homogenisiert werden. DWORAK (2013) wählte die Pulsparameter so, dass im Vergleich zum Rechteckpuls die gleiche Energie pro Puls in das Werkstück eingebracht wurde. Es konnte gezeigt werden, dass trotz identischen Energieeintrags bzw. mittlerer Ausgangsleistung eine um 26% größere Einschweißtiefe mittels des geformten Pulses erreicht werden konnte.



*Prozessparameter für den geformten Puls*

Parameter	Wert
$\tau_p$	8 ms
$P_1$	5556 W
$P_2$	2778 W
$P_3$	556 W
$v_s$	1,6 mm/s

Abbildung 3-4: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines geformten Pulses und in der Literatur angegebene Prozessparameter zum Schweißen von Stahl (nach: DWORAK 2013)

### Abfallender Puls

Der abfallende Puls wurde von KRAMER ET AL. (2002) vorgestellt und die auf seiner Anwendung beruhende Strategie unterscheidet sich grundlegend von den zuvor genannten Strategien. Die Schweißnaht wird bei diesem Verfahren durch eine vergleichsweise lange Pulsdauer in Kombination mit einer hohen Vorschubgeschwindigkeit hergestellt. Dadurch ergibt sich kein Schweißpunkt, sondern eine Linie, deren Länge von der Pulsdauer und der Scangeschwindigkeit abhängt. Dieses Verfahren wird eingesetzt, um Welle-Nabe-Verbindungen in der Feinwerktechnik zu fügen. Es ist auch unter dem Begriff SHADOW<sup>5</sup>-Strategie bekannt. Die resultierende kontinuierliche Naht gewährleistet eine verbesserte Kraftübertragung.

Eine exemplarische Pulsform des von KRAMER ET AL. (2002) vorgeschlagenen Pulses zum Schweißen von 250  $\mu\text{m}$  dicken Kupferblechen ist in Abbildung 3-5 gezeigt. Analog zum geformten Puls wird auch hier zu Beginn des Pulses die maximale Pulsleistung  $P_1$  erreicht. Anschließend fällt der Puls auf 75 % der maximalen Pulsleistung ab. Bei 50 % der Pulsdauer wird das Leistungsniveau  $P_2$  erreicht. Die aus dem Puls nach KRAMER ET AL. (2002) resultierende Schweißnaht hat aufgrund der verwendeten Kombination aus Schweißgeschwindigkeit und Pulsdauer eine Länge von 3,3 mm. Trotz der schlechten Schweißbeignung von Kupfer konnte eine gleichmäßige und konstante Nahtoberfläche erreicht werden. Weiterhin wurde die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses hervorgehoben.

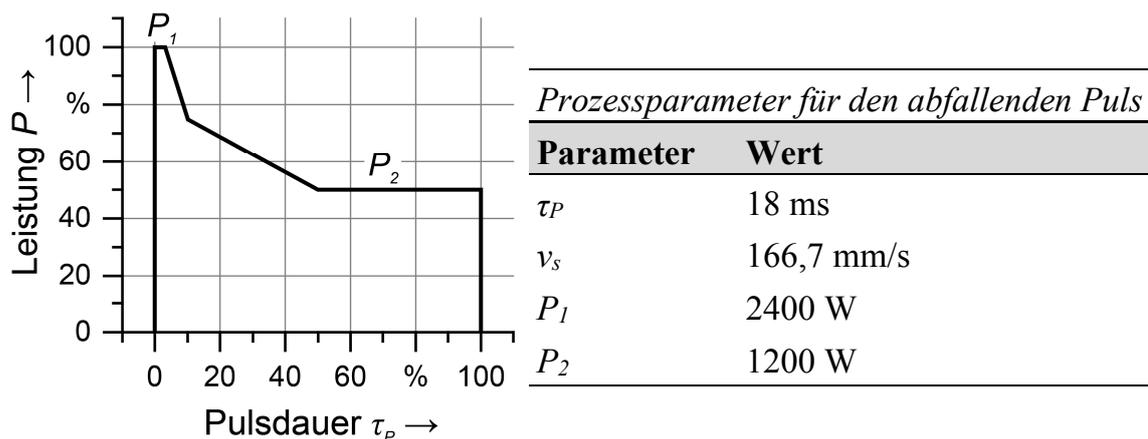


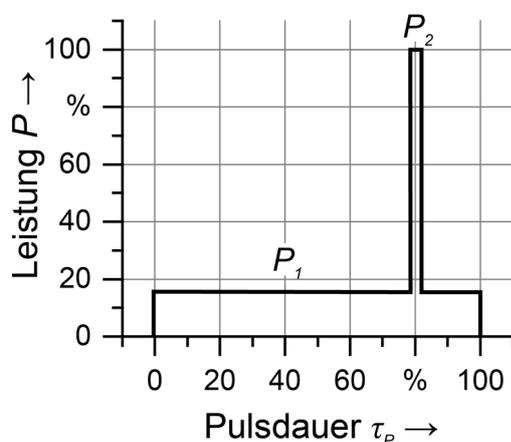
Abbildung 3-5: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines abfallenden Pulses mit aus der Literatur abgeleiteten Prozessparametern zum Schweißen von 0,25 mm dicken Kupferblechen (nach: KRAMER ET AL. 2002)

<sup>5</sup> SHADOW ist ein Akronym für Stepless High Speed Accurate and Discrete One Pulse Welding.

## Spike-Puls

Das Spike-Puls-Verfahren wurde von DIJKEN ET AL. (2003) vorgestellt, um Bauteile im Überlappstoß mit hohen Spalttoleranzen zu fügen. Der Spike-Puls eignet sich, um Lücken zwischen den Fügepartnern zu überbrücken, die bis zu 100% der Werkstückdicke betragen. Für die experimentellen Untersuchungen wurden Edelstahlbleche (X8CrNi1812) mit einer Dicke von 0,25 mm verwendet.

Die Pulsform sowie die verwendeten Parameter werden in Abbildung 3-6 vorgestellt. Während des Leistungsniveaus  $P_1$  wird das Werkstück aufgeschmolzen, wodurch ein Schmelzbad analog zum Wärmeleistungsschweißen (vgl. Abschnitt 2.3.3) entsteht. Die Temperatur des Werkstoffes sollte dabei unterhalb der Verdampfungstemperatur bleiben. Das Leistungsniveau  $P_2$ , welches um knapp eine Größenordnung über  $P_1$  liegt, wird nur für einen vergleichsweise kurzen Zeitraum appliziert. Durch diesen Peak verdampft die Schmelzbadoberfläche lokal. Durch den Dampfdruck wird die Schmelze auf den zweiten Fügepartner bewegt, sodass auch bei einem relativ großen Spalt eine Fügeverbindung entsteht. Abschließend folgt ein weiterer Pulsabschnitt mit der reduzierten Leistung  $P_1$ , um die Schmelze wieder zu homogenisieren und Poren zu vermeiden. Als Vorteil dieses Verfahrens wurde der reduzierte Energieeintrag hervorgehoben, der durch die kurze Pulsspitzenleistung begründet ist.



Prozessparameter für den Spike-Puls	
Parameter	Wert
$\tau_P$	20 ms
$P_1$	2400 W
$P_2$	1200 W

Abbildung 3-6: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Verlaufs eines Spike-Pulses und in der Literatur angegebene Prozessparameter zum Schweißen von 0,25 mm dicken Stahlblechen (nach: DIJKEN ET AL.)

Das Spike-Puls-Verfahren wurde auch von BRITTEN ET AL. (2015) eingesetzt, um 200  $\mu\text{m}$  dicke Leiterbahnen aus CuFe2P über einen 100  $\mu\text{m}$  großen Spalt hinweg mit dünnen metallischen Schichten zu verbinden. Die geringe Einschweißtiefe und thermische Belastung durch dieses Verfahren machten den Fügeprozess auch auf thermisch sensiblen Werkstoffen wie Silizium- oder Keramiksubstraten möglich. Im

Gegensatz zu DIJKEN ET AL. (2003) wurde eine wesentlich höhere Leistung benötigt, um den Kupferwerkstoff aufzuschmelzen. Weiterhin wurde nach der Pulsspitzenleistung ein geringeres Leistungsniveau appliziert als vor dem Peak. Dieses Verfahren wurde von BRITTEN ET AL. (2015) als LIMBO<sup>6</sup> bezeichnet. (BRITTEN ET AL. 2015, BRITTEN 2016)

### 3.3 Optimierung der Zellkontaktierung

SCHMIDT ET AL. (2014) entwickelten eine Methode zur Minimierung des elektrischen Widerstands und Maximierung der mechanischen Festigkeit einer Verbindung im Überlappstoß zur Anwendung für die Kontaktierung von prismatischen Batteriezellen. Die Anbindungsfläche dieser Verbindung wird durch eine festgelegte Anzahl von Schweißpunkten dargestellt, die in einem vorgegebenen Definitionsbereich optimal verteilt werden müssen. Die Koordinaten der Schweißpunkte sind demnach die Variablen der Optimierung. Das Ziel war die geometrische Anordnung der Kontakte zu ermitteln, bei welcher der elektrische Widerstand minimal und die mechanische Festigkeit maximal ist. Das entsprechende Optimierungsproblem für beide Fälle ist in Abbildung 3-7 verdeutlicht. Für den elektrischen Widerstand ist die Potentialdifferenz zwischen den beiden Messpunkten  $U_1$  und  $U_2$ , bei einem festgelegten Referenzstrom  $I_0$ , den zu minimierenden Zielwert (vgl. Abbildung 3-7 a). Der zweite Zielwert war die maximal auftretende elastomechanische Spannung  $\sigma_{max}$  der Überlappverbindung (vgl. Abbildung 3-7 b).

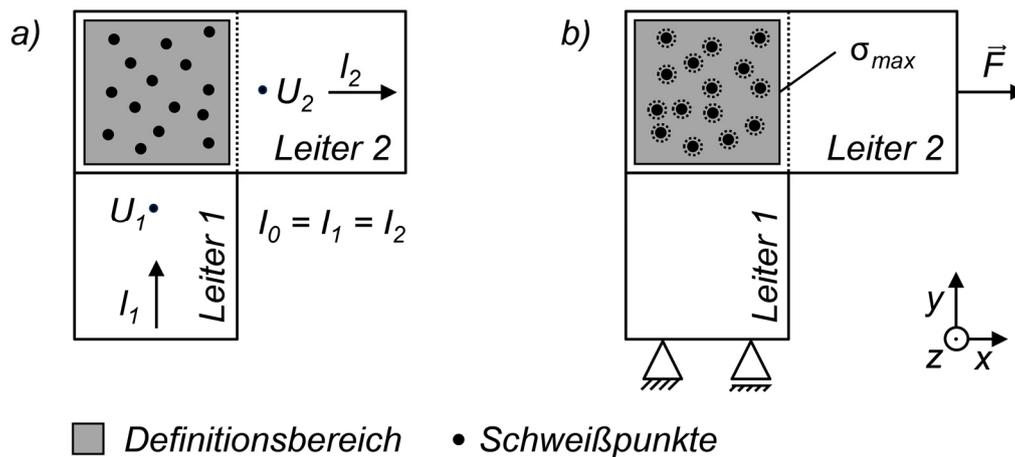


Abbildung 3-7: Randbedingungen des Optimierungsproblems gemäß SCHMIDT 2015; a) elektrischer Widerstand; b) mechanische Festigkeit (nach SCHMIDT 2015, S. 44)

<sup>6</sup> LIMBO ist ein Akronym für Laser Impulse Metal Bonding.

Zur Lösung dieses multikriteriellen Optimierungsproblems wurde ein Genetischer Algorithmus, der mit einer thermoelektrischen und einer elastomechanischen Finite-Elemente-Simulation (FE-Simulation) gekoppelt war, verwendet. Ein Individuum ist eine mögliche Anordnung von Schweißpunkten im Definitionsbereich und wird durch Gene beschrieben. Die Gene beinhalten die Anzahl, die Größe und die Position der Schweißpunkte. In der Fitnessfunktion werden die elektrische Potenzialdifferenz und die mechanische Spannung des Individuums bewertet und gewichtet. In der ersten Generation werden für die Initialisierung entsprechend der Populationsgröße zufällige Schweißpunktverteilungen generiert und deren Fitness bestimmt. Mittels des Genetischen Algorithmus werden die Individuen innerhalb der nachfolgenden Generationen verändert, bis das Abbruchkriterium erreicht ist. Um die Lösung weiter zu verbessern, besteht die Möglichkeit, ein Optimum manuell abzuleiten. Ausgewählt wird diese manuell erstellte Lösung, wenn bei einem Zurückführen in die letzte berechnete Generation eine Verbesserung des Fitnesswerts auftritt. Dieses Vorgehen wird als *erweiterte Initialisierung* bezeichnet (SCHMIDT 2015, S. 92).

Innerhalb der Studie von SCHMIDT (2015, S. 83-108) wurden zu dem gegebenen Optimierungsproblem mit der vorgestellten Methode verschiedene Simulationen durchgeführt. Zunächst wurde die Schweißpunktverteilung rein thermoelektrisch mit einem fließenden Strom  $I_0$  von 200 A simuliert und ein Optimum abgeleitet. Anschließend wurde der rein elastomechanische Fall untersucht, wenn eine Kraft von 200 N in x-Richtung am Bauteil angreift. Auch eine multikriterielle Optimierung mit Stromlast und mechanischer Last wurde berechnet. Dabei wurden die mechanische und die elektrische Optimierung in der Zielfunktion gleich gewichtet. Die Ergebnisse der drei Simulationsvarianten sind in Abbildung 3-8 visualisiert.

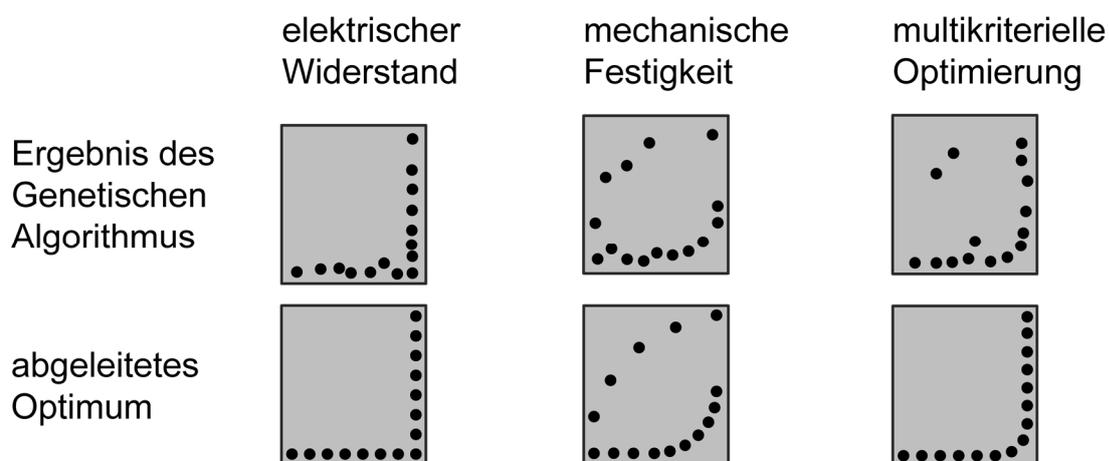


Abbildung 3-8: Optimierungsergebnisse bezüglich des elektrischen Widerstands, der mechanischen Festigkeit und der multikriteriellen Optimierung für eine Überlappverbindung zur Anwendung für die Kontaktierung von prismatischen Batteriezellen (nach SCHMIDT 2015, S. 122)

### 3.4 Topologieoptimierung

Topologieoptimierungen werden häufig durch die Kopplung von FE-Simulationsmodellen und Optimierungsverfahren erreicht. In einem definierten Bau- raum wird nach einer optimalen Verteilung von Werkstoff und Leerstellen gesucht. Die Parametrisierung der Problemstellung wird durch die Beziehung zwischen Geno- und Phänotyp definiert. Der Phänotyp ist dabei eine Lösung im Kontext des origina- len Problems. Für das Beispiel einer Topologieoptimierung beschreibt der Phänotyp die Geometrie der Struktur. Das eigentliche Optimierungsproblem, bei der Topolo- gieoptimierung meist durch ein FE-Modell implementiert, wird durch einen Satz von variablen Genen abgebildet. Die Darstellungsart des Optimierungsproblems be- stimmt den Aufbau der Gene. Außerdem werden durch den Genotyp die Dimensio- nen des Suchraums, die Wahrscheinlichkeit zur Identifikation verbesserter Lösungen, die Prozessrate der Optimierung und die bestmögliche Nähe zu einem Optimum be- einflusst. (BITTNER 2013, S. 85)

AULIG & OLHOFFER (2016) untersuchten verschiedene Ansätze zur Topologieoptimie- rung mechanisch belasteter Strukturen mittels evolutionärer Berechnungsmethoden. Besonders hervorgehoben wurden die Darstellungsarten der zu optimierenden Geo- metrie, wobei in Abhängigkeit von der zu optimierenden Struktur eine Gliederung vorgeschlagen wurde: Gitterdarstellung sowie geometrische und indirekte Repräsen- tationsart (vgl. Abbildung 3-9). Bei der Gitterdarstellung wird die Struktur der Geo- metrie direkt über die Elemente des Gitters beschrieben. Im Gegensatz dazu sind die Gene bei der geometrischen Repräsentation des Problems die Form, die Position oder die Dicke des geometrischen Grundkörpers, aus denen sich die Lösung zusammen- setzt. Der indirekte Ansatz optimiert ein generisches Modell, welches beispielsweise das Wachstum der Struktur, ausgehend von einem Punkt, bestimmt. (AULIG & OLHOFFER 2016)

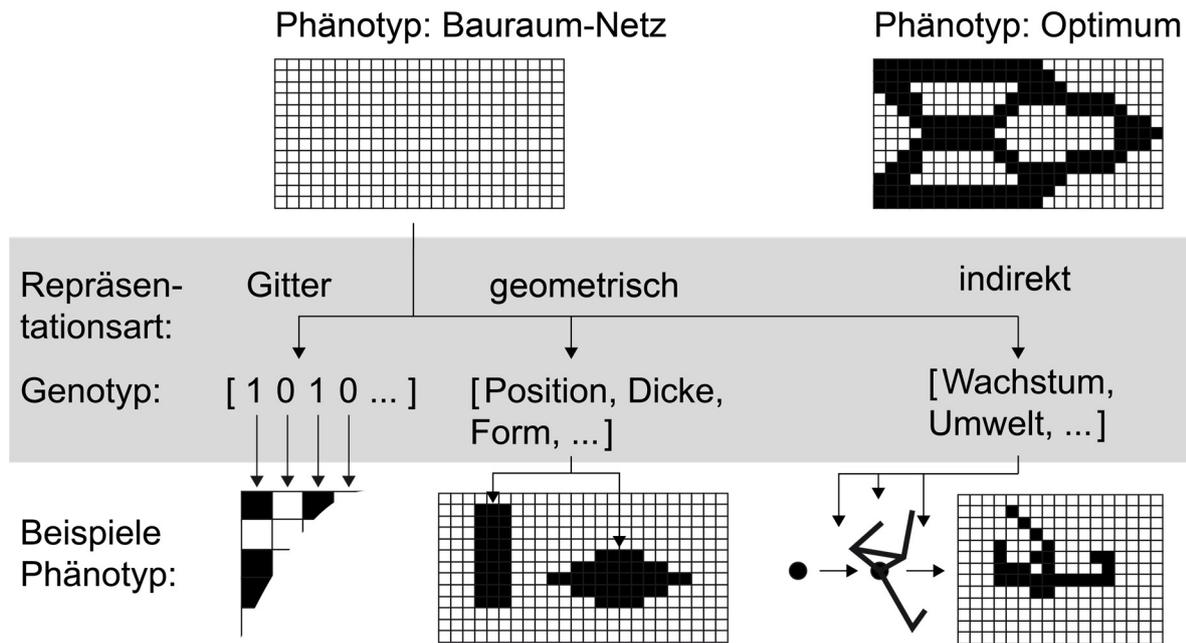


Abbildung 3-9: Möglichkeiten zur Repräsentation einer Struktur für die Topologieoptimierung (nach AULIG & OLHOFFER 2016)

In den ersten Iterationen konvergieren die Lösungen der Genetischen Algorithmen sehr schnell. Mit zunehmender Annäherung an das globale Optimum wird der Algorithmus jedoch langsamer. Zur Effizienzsteigerung etablierten sich bei der Topologieoptimierung mittels Bit-Array-Repräsentationen zweistufige Ansätze. Hierbei wurden in der ersten Phase der Optimierung verschiedene Lösungen bei Vorgabe von Bauraum und Netzgröße erzeugt. Diese Lösungen wurden in einer zweiten Phase lokal verbessert, um das globale Optimum zu erreichen (BALAMURUGAN ET AL. 2011). Im Folgenden werden mehrere dieser Ansätze vorgestellt.

CAPPELLO & MANCUSO (2003) koppelten Topologieoptimierung und Formoptimierung. In einem ersten Schritt wurde eine binäre Topologieoptimierung durchgeführt. Die Ränder des Ergebnisses wurden im zweiten Schritt, der Strukturoptimierung, geglättet und verbessert. Zur Definition der Ränder für die Strukturoptimierung wurde die Ergebnisgeometrie der Topologieoptimierung an fertigungsbedingte Restriktionen angepasst.

Von CHEN ET AL. (2017) wurde eine Methode zur zweistufigen Optimierung von Fachwerken mittels Genetischen Algorithmen vorgestellt. Ziel der Optimierung war die Minimierung der Masse des Fachwerks unter dynamischen Randbedingungen. Als Variablen wurden der Balkenquerschnitt, die Balkenform und die Topologie der einzelnen Stäbe des Fachwerks verwendet. Die Querschnittsfläche und die Form der einzelnen Stäbe wurden dabei durch kontinuierliche Variablen beschrieben. In einer ersten Approximation wurde das vorliegende Problem durch von Querschnitts-,

Form- und Topologievariablen abhängiger Funktionen dargestellt. In der ersten Optimierungsstufe wurden Länge und Topologie der Stäbe variiert und jedes Individuum nach seiner Fitness bewertet. Anschließend wurden in einer zweiten Optimierungsstufe die Querschnittsflächen der Stäbe der einzelnen Individuen verbessert. Auf diese Weise konnte die Effizienz des Optimierungsalgorithmus gesteigert werden.

### **3.5 Zusammenfassung und Handlungsbedarf**

Für die Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Das Ultraschallschweißen, das Widerstandspunktschweißen und das Laserstrahlschweißen sind dabei die am häufigsten eingesetzten Verbindungsprozesse für zylindrische Zellen. Der Einsatz von Laserstrahlung bietet im Vergleich zu den anderen Verfahren das höchste Potenzial, da mit ihm sehr geringe Verbindungswiderstände bei gleichzeitig hoher Festigkeit erreicht werden können. Ein weiterer großer Vorteil des Laserstrahlschweißens ist die freie Gestaltung der Anbindungsgeometrie. Für eine beliebige Anzahl von Schweißpunkten lässt sich eine in Bezug auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften optimale Geometrie ermitteln. Allerdings führt die durch den Prozess erzeugte Wärme zu einer kurzzeitigen Temperaturerhöhung der Zelle. Dies ist aufgrund der temperaturempfindlichen Komponenten (vgl. Abschnitt 2.2.5) eine Herausforderung. Handlungsbedarf besteht demnach zunächst bezüglich der Ermittlung der genauen Temperaturänderung innerhalb der Zelle sowie bezüglich der Entwicklung von geeigneten Schweißstrategien zur Reduzierung des Wärmeeintrags. Hierzu konnte bereits gezeigt werden, dass die Applikation von einzelnen, mittels Laserstrahlung erzeugten Schweißpunkten bei nicht hochreflektierenden Werkstoffen (z. B. Aluminium oder Stahl) ein geeigneter Ansatz ist, um bei geringer Temperaturänderung eine vergleichsweise hohe elektrische Leitfähigkeit zu erreichen.

In der Literatur liegt bereits eine Vielzahl von Untersuchungen zum Schweißen mittels gepulster Laserstrahlung vor. Allerdings besteht Forschungsbedarf in der Übertragung dieser Prozesse auf die speziellen Randbedingungen bei der Kontaktierung von zylindrischen Batteriezellen.

Zur Begrenzung der Temperaturänderung und zur Maximierung der Prozessgeschwindigkeit ist es zudem von besonderem Interesse, die minimal erforderliche Anbindungsfläche und damit die Anzahl der notwendigen Schweißpunkte zu ermitteln. Hierzu liegen bisher keine Erkenntnisse vor.

In Bezug auf die parallele Verbindung von Batteriezellen müssen verschiedene Anforderungen beachtet werden, die einen Einfluss auf die Gestaltung der Topologie des Zellverbinders haben. In der Literatur existieren keine Methoden zur Auslegung eines solchen Zellverbinders unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.2.4 erläuterten Aspekte *geringer Widerstand*, *gleicher Widerstand* und *geringe Masse*. Dementsprechend besteht die Notwendigkeit, bekannte Verfahren zur Topologieoptimierung von mechanisch belasteten Strukturen auf das durch den elektrischen Stromfluss definierte Optimierungsproblem zu übertragen. Ein vielversprechender Ansatz für eine effiziente Optimierung ist dabei ein zweistufiges Verfahren. Hierfür wurde in der Literatur ein Genetischer Algorithmus in Kombination mit einer Gitterdarstellung als Repräsentationsart verwendet.

Zusammenfassend kann der folgende Handlungsbedarf, für eine prozesssichere Kontaktierung von zylindrischen Lithium-Ionen-Zellen mittels Laserstrahlung an funktionsgerechte Verbindungselemente abgeleitet werden:

- Für die Kontaktierung der Zellen bedarf es eines prozesssicheren Verfahrens, welches mittels Laserstrahlung einzelne Schweißpunkte herzustellen erlaubt. Hierbei ist die maximal zulässige Temperaturerhöhung des Werkstücks als besondere Randbedingung zu betrachten.
- Für das entwickelte Verfahren muss ein umfangreiches Verständnis für den Zusammenhang zwischen der Anbindungsfläche und den elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Verbindung aufgebaut werden. Diese Eigenschaften müssen in Relation zu den Anforderungen gesetzt werden, um die erforderliche Anbindungsfläche für den jeweiligen Anwendungsfall ermitteln zu können.
- Der Einfluss des Kontaktierungsprozesses auf die Temperaturänderung innerhalb der Zelle muss untersucht werden, wobei eine hervorgerufene Veränderung der Zelleigenschaften Gegenstand der Untersuchungen sein sollte.
- Für eine automatisierte und anforderungsgerechte Auslegung des Zellverbinders muss eine Methode zur multikriteriellen Optimierung der Topologie entwickelt werden.
- Abschließend sind die Ergebnisse anhand eines Zellverbunds zu validieren und eine technologische sowie wirtschaftliche Bewertung durchzuführen.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit werden Forschungsergebnisse vorgestellt, die diese Aspekte behandeln. Zu deren Generierung war zunächst eine Versuchsumgebung erforderlich, die im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird.

## 4 Versuchsumgebung

### 4.1 Allgemeines

Um die in Abschnitt 3.5 vorgestellten Handlungsfelder zu bearbeiten, wurden im Rahmen dieser Arbeit Versuche durchgeführt. In diesem Kapitel wird die zugehörige Versuchsumgebung vorgestellt. Zunächst werden in Abschnitt 4.2 die Laserstrahlquelle und die Scanneroptik beschrieben. Die Versuchsaufbauten der verschiedenen Schweißexperimente werden anschließend in Abschnitt 4.3 aufgeführt, wobei die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe in Abschnitt 4.4 zu finden sind. Zur Analyse der mechanischen und elektrischen Eigenschaften sowie der Zellkapazität wurden verschiedene Messaufbauten verwendet, die in Abschnitt 4.5 veranschaulicht werden.

### 4.2 Lasersystemtechnik

Die Lasersystemtechnik besteht neben den Spannmitteln und der Kühlung aus der Strahlquelle und der Scanneroptik. Als Strahlquelle wurde ein Multi-Mode-Scheibenlaser mit der Bezeichnung TruDisk 4001 der Firma *TRUMPF GmbH & Co. KG* verwendet. Dieser Yb:YAG-Laser hat eine charakteristische Wellenlänge von 1030 nm und eine maximale Ausgangsleistung von 4000 W. Die Laserstrahlung wurde mittels Lichtleitkabel mit einem Kerndurchmesser von 100  $\mu\text{m}$  zur Bearbeitungsposition geführt. Das Strahlparameterprodukt der Strahlung beträgt 4 mm·mrad und hat eine homogene Intensitätsverteilung (Top-Hat-Verteilung).

Die verwendete Scanneroptik der Firma *TRUMPF GmbH & Co. KG* hat die Bezeichnung PFO 33 und ermöglicht die Auslenkung der Laserstrahlung innerhalb eines elliptischen Bearbeitungsfelds mit einer Haupt- und einer Nebenachsenlänge von 180 mm bzw. 104 mm. Die Brennweite der Linse beträgt 255 mm, wobei in der Fokusebene ein Strahldurchmesser von 170  $\mu\text{m}$  erreicht wird. Die Rayleighlänge der Strahlung beträgt 2,5 mm. Die Kenngrößen der Lasersystemtechnik sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Kenngrößen der eingesetzten Strahlquelle und der Scanneroptik

<b>Strahlquelle TRUMPF TruDisk 4001</b>	
maximale Laserleistung $P_{L,max}$	4000 W
Wellenlänge $\lambda$	1030 nm
Kerndurchmesser des Lichtleitkabels $d_{LLK}$	100 $\mu\text{m}$
Strahlparameterprodukt $SPP$	4 mm·mrad
<b>Scanneroptik TRUMPF PFO 33</b>	
Brennweite $f_f$	255 mm
Scanfeldgröße	180 mm · 104 mm
Fokusbrenndurchmesser $d_f$	170 $\mu\text{m}$
Rayleighlänge $z_R$	2,5 mm

## 4.3 Versuchsaufbau

### 4.3.1 Schweißversuche

Für die Schweißversuche der vernickelten Stahlbleche im Überlappstoß wurde die in Abbildung 4-1 visualisierte Spannvorrichtung verwendet. Die beiden Fügepartner können mittels Spannelementen aufeinander fixiert werden, wobei die Spannkraft über eine Spanmmaske aus Aluminium aufgebracht werden kann. Um eine thermische Dämmung der Bleche gegenüber der Spannvorrichtung zu erreichen, wurde eine Kunststoffplatte eingesetzt.

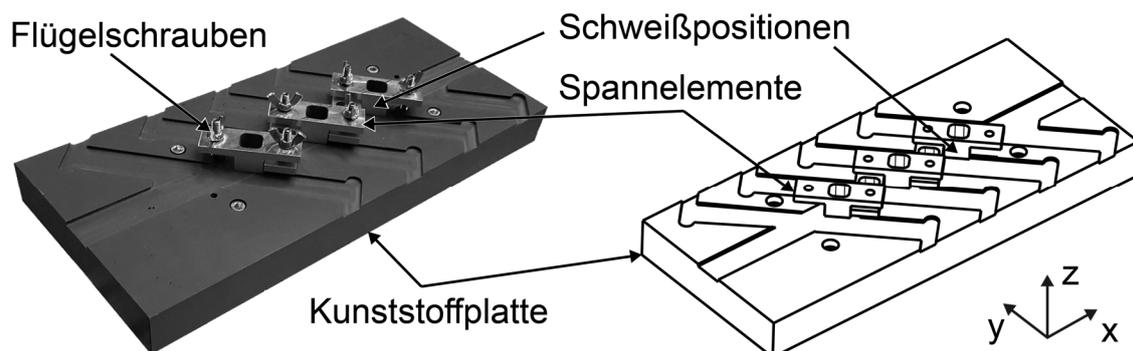


Abbildung 4-1: Spannvorrichtung für die Schweißversuche an vernickelten Stahlblechen; links: Foto; rechts: Zeichnung

### 4.3.2 Thermische Analyse

Für die Messung der prozessbedingten Temperaturveränderung und für die Analyse der Vibrationsbeständigkeit mussten Bleche an leere Zellgehäuse verschweißt werden. Die hierfür verwendete Spannvorrichtung ist in Abbildung 4-2 gezeigt. Das Zellgehäuse wird mit einem Zylinder räumlich fixiert und durch Federelemente an ein Spannelement gedrückt. Durch diesen Aufbau kann eine reproduzierbare z-Position des Werkstücks realisiert werden. Am Zylinder ist eine weitere Feder fixiert, welche den Kontakt des Thermoelements an der inneren Seite des Zellgehäuses sicherstellt. Durch die Ausrichtung mittels Zylinder ist das Thermoelement für die Messung der Temperatur immer in der Mitte des Zellgehäuses positioniert. Der Aufbau kann zudem für das Verschweißen von funktionsfähigen zylindrischen Zellen verwendet werden, wenn der Zylinder aus dem Aufbau entfernt wird.

Für die Temperaturmessung wurde ein Thermoelement vom Typ K der Firma *RS Pro GmbH* verwendet. Der messbare Temperaturbereich liegt zwischen  $-100\text{ °C}$  und  $250\text{ °C}$ . Die Messfrequenz betrug  $100\text{ Hz}$ .

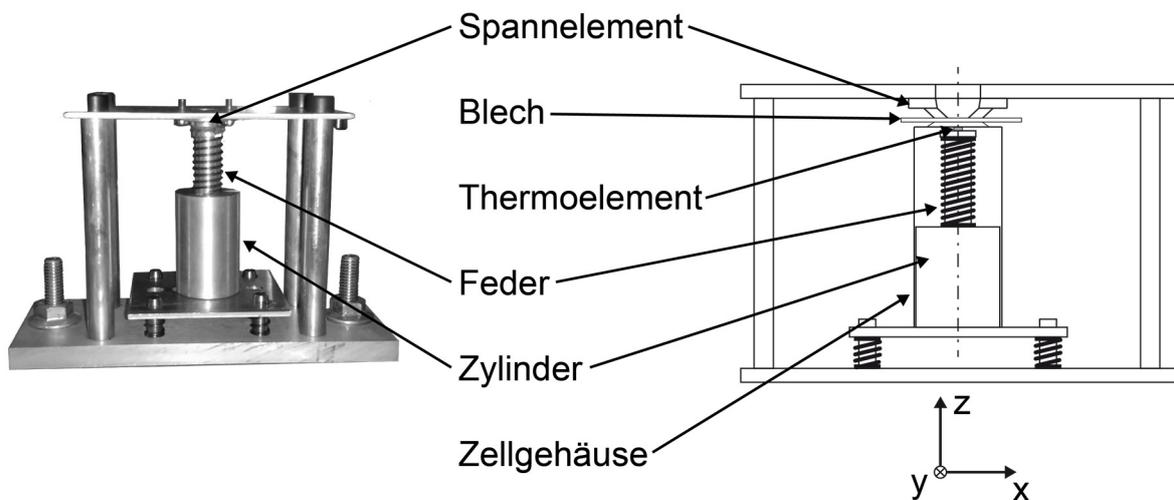


Abbildung 4-2: Spannvorrichtung für die Schweißversuche an Zellgehäusen mit Temperaturmessung; links: Foto; rechts: Zeichnung

### 4.3.3 Kontaktierung eines Zellverbunds

Für die Kontaktierung des Zellverbunds wurde eine Spannvorrichtung eingesetzt, mit der es möglich war, einen Pol von allen 24 Zellen innerhalb des Verbunds gleichzeitig zu fixieren. Hierfür wurde durch eine Linearachse die Spannkraft über 24 einzelne Spannelemente eingebracht. Über drei Federelemente in jedem Spannelement wurde die Spannkraft auf die Fügepartner weitergeleitet. Für eine ausführliche Beschreibung sowie eine Darstellung der Spannvorrichtung wird auf (SCHMIDT ET AL. 2016) verwiesen.

## 4.4 Werkstoffe

Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, besteht das Gehäuse der zylindrischen Zellen aus vernickeltem Stahl. Innerhalb dieser Arbeit wurden Ableiterbleche aus demselben Werkstoff verwendet, sodass in den Schweißversuchen in Kapitel 5 gleichartige Verbindungen betrachtet wurden.

Der eingesetzte Werkstoff wird auch als Hilumin bezeichnet. Hilumin ist ein diffusionsgeglühter hochreiner Bandstahl (DC04) mit einer 2  $\mu\text{m}$  dicken elektrolytischen Nickelbeschichtung. Dieser Werkstoff wurde von der Firma *TATA Steel Pvt. Ltd.* für Batterieanwendungen, bei denen ein niedriger Kontaktwiderstand und eine hohe Korrosionsbeständigkeit Voraussetzung sind, entwickelt. Hilumin entspricht der Norm DIN EN 10139 für weiche unlegierte Qualitätsstähle. Der Kohlenstoffgehalt liegt zwischen 0,20 und 0,65 %. Die wichtigsten Werkstoffkennwerte von Hilumin sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

*Tabelle 4-2: Relevante Werkstoffkennwerte von vernickeltem Stahl DC04 (Hilumin)*

<b>Eigenschaft</b>	<b>Wert</b>
elektrische Leitfähigkeit $\sigma$	9,93 m/( $\Omega \cdot \text{mm}^2$ )
Liquidustemperatur $T_M$	1809 K
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_Q$	52 W/(m $\cdot$ K)
Dichte $\rho$	7870 kg/m <sup>3</sup>
Zugfestigkeit $R_m$	270–690 MPa
E-Modul $E$	210 GPa

Für die Analyse der elektrischen Kapazität in Abhängigkeit von der Temperaturveränderung gemäß Abschnitt 6.3 sowie für die Herstellung eines Zellverbunds gemäß

Abschnitt 8.3 wurden zylindrische Lithium-Ionen-Zellen vom Typ 26650 des Herstellers *Sony Corporation* verwendet. In der Zelle wird als Kathodenaktivmaterial Lithiumeisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ) und als Anodenaktivmaterial Graphit verwendet. Der grundsätzliche Aufbau und die Funktionsweise der Zelle wurden bereits in Abschnitt 2.2.2 beschrieben. In Tabelle 4-3 sind die Eigenschaften der Zelle aufgelistet.

Tabelle 4-3: *Relevante Eigenschaften der verwendeten Lithium-Ionen-Zelle (NEWNHAM ET AL. 2013)*

Eigenschaft	Wert
Hersteller	Sony Corporation
Bezeichnung	US26650FT
Nennkapazität	3000 mAh
Nennspannung	3,2 V
Ladeschlussspannung	3,6 V
Entladeschlussspannung	2 V
Masse	85 g
Länge	65 mm
Durchmesser	26 mm

## 4.5 Auswertemethodik

### 4.5.1 Messung des elektrischen Widerstands

Für die Messung des elektrischen Widerstands wurde in der vorliegenden Arbeit die Vier-Punkt-Leiter-Messmethode (Abbildung 4-3) verwendet. Diese Methode basiert darauf, dass mit einem zeitlich konstanten Stromfluss im Bauteil eine Potenzialdifferenz einhergeht. Die Potenzialdifferenz kann unabhängig von dem Stromfluss gemessen werden. Die Zuleitungs- und Übergangswiderstände gehen dabei aufgrund des konstanten Stroms und der hohen Innenwiderstände des Spannungsmessgeräts nicht in die Messung ein.

Als Spannungs- und Stromquelle diente das Messgerät BT3562 der Firma *Hioki E.E. Corporation*. Die Potenzialdifferenz wurde in einem Abstand  $l_x$  von 26,5 mm gemessen. Der Gesamtwiderstand  $R_x$  zwischen den Messpunkten wurden anhand der Potenzialdifferenz und des Prüfstroms  $I_0$  bestimmt. Für eine ausführliche Beschreibung und eine Abbildung des Messaufbaus wird auf (SCHMIDT 2015, S. 56 ff.) verwiesen.

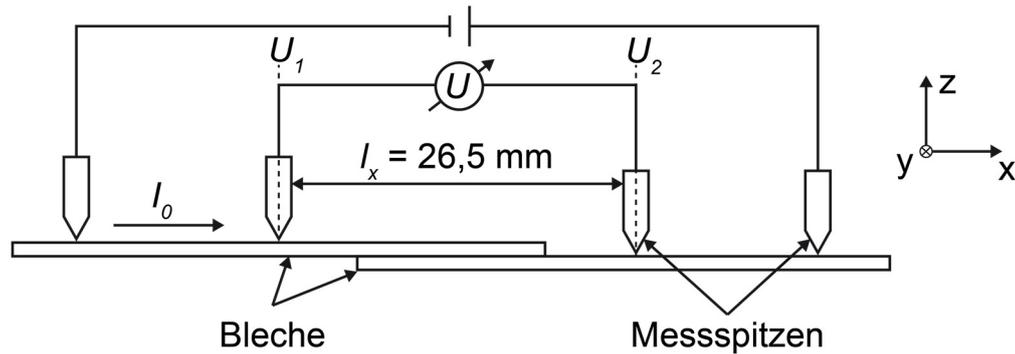


Abbildung 4-3: Vier-Punkt-Leiter-Messung zur Bestimmung des elektrischen Widerstands; gemessen wurde der Spannungsabfall  $U_x = U_2 - U_1$

#### 4.5.2 Messung der Scherzugfestigkeit

Die maximale Scherzugfestigkeit der verschweißten Metallbleche wurde durch eine zerstörende Prüfung mit der Zugprüfmaschine Z020 der Zwick Roell AG bestimmt. Der Versuch wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 14273 durchgeführt, wobei die Überlappverbindung durch eine parallel zur Hauptachse wirkende Zugkraft belastet wurde. Die Einspannlänge betrug dabei 70 mm. Mittels Kraftaufnehmer wurde die beim Versagen der Probe auftretende Kraft ermittelt.

#### 4.5.3 Messung der Vibrationsbeständigkeit

Um die Vibrationsbeständigkeit der Fügeverbindungen zu untersuchen, wurde der Schwingungsanreger TIRAvib S 51140 der Firma TIRA GmbH verwendet. Der elektrodynamische Messwandler erzeugt eine Sinusvektorkraft von 400 N innerhalb eines Frequenzbereichs von 2 Hz bis 6500 Hz. An dem Schwingungsanreger wurde ein Zylinder montiert, der an das Zellgehäuse verschraubt wurde (Abbildung 4-4). Zur Fixierung des Ableiterblechs wurde eine Spannvorrichtung integriert. Die Zellhülle wurde angeregt, bis die Kontaktierung zwischen Ableiterblech und Zellhülle versagte oder das Ende des Vibrationszyklus erreicht wurde. Der Abstand zwischen Zellachse und starrer Aufhängung  $a_{AF} = 15 \text{ mm}$  entspricht dem Abstand zwischen Ableiterblech und Zellverbinder des innerhalb dieser Arbeit betrachteten Zellverbunds. Auf der Probe wurde ein uniaxialer Miniatur-Vibrationsaufnehmer PCB-352A24/NC befestigt, um die Systemantwort zu messen. Bei dem verwendeten Beschleunigungssensor handelte es sich um einen piezoelektrischen Sensor der Firma PCB Piezotronics Inc.

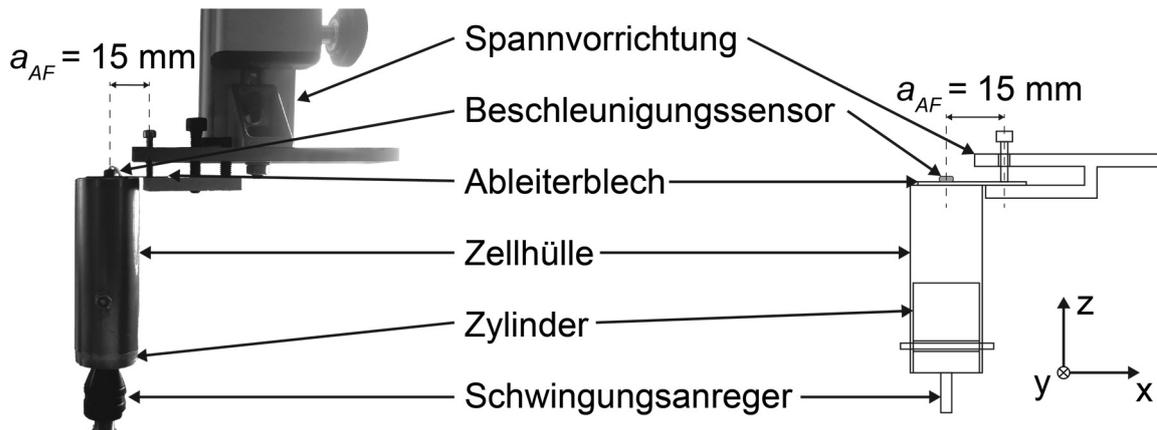


Abbildung 4-4: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Vibrationsbeständigkeit; links: Foto; rechts: Zeichnung

#### 4.5.4 Messung der Zellkapazität

Zur Messung der Zellkapazität wurden die Batteriezellen an einen Zelltester vom Typ *ZT600-II* der *Ruhr Universität Bochum* angeschlossen. Die Zellen wurden mittels CC-CV-Verfahren (constant current - constant voltage) geladen, wobei der konstante Ladestrom zu Beginn des Ladezyklus 3 A entsprach. Nach Erreichen der Ladeschlussspannung von 3,6 V wurde die Spannung konstant gehalten, bis ein Ladestrom von 0,25 A erreicht wurde. Das Entladen der Zellen erfolgte mit einer Stromstärke von 3 A, bis die Entladeschlussspannung von 2,0 V erreicht wurde. Für die Analyse der Zellkapazität wurde die Ladekapazität der Zellen ausgewertet.

Um einen Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Zellkapazität zu vermeiden, wurden die Zellen während der Messung in einem Temperaturschrank mit der Bezeichnung *MK 240* der Firma *BINDER GmbH* bei einer konstanten Temperatur von 25 °C gelagert.

## 4.6 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel beschriebene Versuchsumgebung diente als Grundlage zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen gemäß den nachfolgenden Kapiteln. Mit der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Lasersystemtechnik wurde der Werkstoff Hilumin an gleichartige Bleche bzw. an funktionsfähige Batteriezellen vom Typ 26650 geschweißt, deren Eigenschaften in Abschnitt 4.4 vorgestellt wurden. Verwendet wurden dabei Spannvorrichtungen, deren Funktionsweisen in Abschnitt 4.3 diskutiert wurden. Die Ergebnisse dieser Schweißversuche wurden anschließend auf

ihre elektrischen sowie mechanischen Eigenschaften hin untersucht. Weiterhin wurden Messungen der Zellkapazität durchgeführt. Die dafür eingesetzte Messtechnik wurde in Abschnitt 4.5 erläutert.

# 5 Auslegung des gepulsten Laserstrahlschweißprozesses für die Zellkontaktierung

## 5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird anhand experimenteller Untersuchungen die Entwicklung eines gepulsten Laserstrahlschweißprozesses zur Kontaktierung von zylindrischen Batteriezellen beschrieben. Aus den Betrachtungen zum Stand der Technik in Abschnitt 3.2 geht hervor, dass Schweißpunkte zu einer Verbindung mit einer sehr guten elektrischen Leitfähigkeit bei gleichzeitig sehr geringem Wärmeeintrag führen. Dementsprechend ist dieser Schweißprozess insbesondere für die vorliegende Problemstellung zur Kontaktierung von zylindrischen Zellen relevant (vgl. Abschnitt 2.2.5).

In Abschnitt 5.2 ist beschrieben, wie zunächst vier verschiedene Strategien für das gepulste Laserstrahlschweißen auf ihre Eignung zum Verbinden von dünnen vernickelten Stahlblechen untersucht wurden. Anhand von einzelnen Schweißpunkten wurden die Ergebnisse des resultierenden elektrischen Widerstands und der mechanischen Scherzugfestigkeit bewertet, um eine Strategie für die nachfolgenden Prozessuntersuchungen gemäß Abschnitt 5.3 auszuwählen. Das Ziel war die Ermittlung von geeigneten Prozessparametern für einen reproduzierbaren Schweißprozess.

Nachdem die Prozessparameter zur Herstellung der Schweißpunkte festgelegt wurden, wird in Abschnitt 5.4 diskutiert, welche Anbindungsfläche in Abhängigkeit der elektrischen und mechanischen Anforderungen bei der Kontaktierung notwendig ist. Grundlage hierfür sind experimentelle Untersuchungen zum elektrischen Widerstand, zur mechanischen Scherzugfestigkeit und zur Vibrationsbeständigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Schweißpunkte und ihrer geometrischen Anordnung.

Abschließend werden die innerhalb dieses Kapitels gewonnenen Erkenntnisse in Abschnitt 5.5 zusammengefasst. Die Inhalte zur Auswahl einer Schweißstrategie und die Prozessuntersuchungen wurden vom Verfasser teilweise schon in (SCHMITZ 2016) und in (SCHMITZ ET AL. 2018) veröffentlicht.

## 5.2 Prozessstrategien für das gepulste Laserstrahlschweißen

In diesem Abschnitt ist beschrieben, wie die vier gepulsten Schweißstrategien, welche in Abschnitt 3.2.3 vorgestellt wurden, hinsichtlich ihrer Tauglichkeit zum Schweißen von dünnen Blechen aus vernickeltem Stahl untersucht wurden. Die resultierenden mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Verbindung wurden verglichen, um eine geeignete Strategie für die Kontaktierung von zylindrischen Zellen auszuwählen.

Für die Versuche wurde zunächst eine geeignete Probengeometrie definiert, mit der die Messung des elektrischen Widerstands und der Scherzugfestigkeit durchgeführt werden konnte. In Abbildung 5-1 ist gezeigt, wie aus der geometrischen Anordnung bei der Zellkontaktierung die Probengeometrie abgeleitet wurde. Zwei Bleche wurden dabei im Überlappstoß mit einer Überlapplänge von 20 mm verschweißt. Die Geometrie der Schweißnaht entsprach einer Linie mit 10 mm Länge. Bedingt durch die Schweißstrategie konnte nur mittels abfallendem Puls eine durchgehende Schweißnaht erreicht werden. Die einzelnen Schweißpunkte der anderen Strategien wurden innerhalb einer Punktfolge gleichmäßig über die Länge der Linie verteilt. Die Dicke der Bleche entsprach mit 0,2 mm der Dicke des Batteriegehäuses und des Ableiterblechs. Der Werkstoff der Bleche war vernickelter Stahl (Hilumin) (vgl. Abschnitt 4.4).

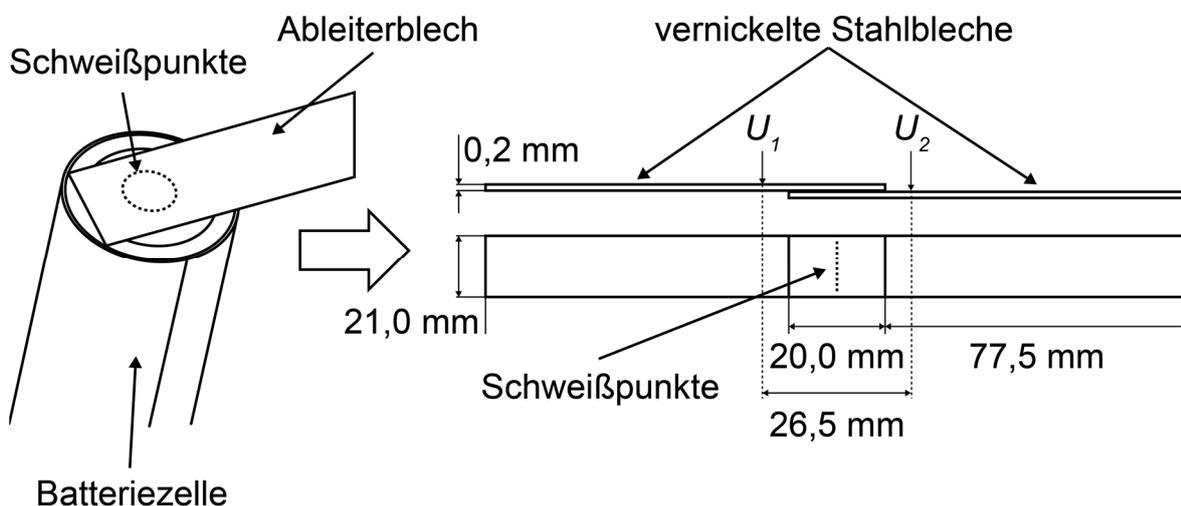


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der zylindrischen Zelle mit Ableiterblech und der abgeleiteten Probengeometrie; für die Vier-Punkt-Leitmessung gemäß Abschnitt 4.5.1 wurde der Spannungsabfall  $U_x = U_2 - U_1$  gemessen

Für das Schweißen mittels gepulster Laserstrahlung müssen mehr Prozessparameter in Betracht gezogen werden, als für das Schweißen mit kontinuierlich emittierender

Strahlung (vgl. Abschnitt 2.3.4). Aus diesem Grund wurde für die Ermittlung von Prozessparametern ein geeignetes Vorgehen festgelegt. Hierzu wurden zunächst Voruntersuchungen durchgeführt, um den Parameterraum einzugrenzen. In Abhängigkeit der Strategie wurde eine vereinfachte Pulsform oder zunächst nur ein Teil des Gesamtpulses appliziert. Auf diese Weise konnte die Anzahl der Freiheitsgrade signifikant reduziert werden. Im Folgenden ist das Vorgehen innerhalb der Vorversuche beschrieben.

Für alle Versuche wurde der Arbeitsabstand in Bezug auf die Fokusebene um den Betrag einer Rayleighlänge von 2,5 mm vergrößert, was auf dem Werkstück in einem Strahldurchmesser von etwa 300  $\mu\text{m}$  resultiert (vgl. Formel (2-1)). Dadurch kann eine größere Anbindungsfläche pro Puls erreicht werden. Die Laserleistung wurde innerhalb der Vorversuche sukzessive vergrößert, um zwei entscheidende Werte festzulegen: Die Leistung, die notwendig war, um das obere Blech vollständig aufzuschmelzen, sowie die Leistung, welche in einem Durchschweißen beider Bleche resultierte. Diese beiden Werte grenzen das Prozessfenster für die Kontaktierung ein. Im Folgenden wird der individuelle Ansatz für die vier Strategien vorgestellt.

### **Rechteckpuls**

Für die Anwendung des Rechteckpulses wurde der in Abbildung 3-3 veranschaulichte Pulsverlauf verwendet. Das Leistungsniveau ( $P_I$ ) wurde schrittweise innerhalb der Versuche erhöht. Insgesamt wurden drei verschiedene Pulsdauern betrachtet (0,5 ms, 1,0 ms und 2,0 ms). Die Vorschubgeschwindigkeit der Laserstrahlung betrug 500 mm/s.

### **Geformter Puls**

Im Gegensatz zum Rechteckpuls müssen für den geformten Puls mehr Leistungsniveaus in Betracht gezogen werden. Für die Vorversuche wurde nur das erste Leistungsniveau ( $P_I$ ) appliziert (vgl. Abbildung 3-4). Das bedeutet, dass ab einer Pulsdauer von  $20\% \cdot \tau_P$  die Pulsleistung 0 W beträgt. Betrachtet wurden drei verschiedene Pulsdauern (1,0 ms, 2,0 ms und 4,0 ms). Das Ziel der kurzen Phase mit erhöhter Leistung ( $P_I$ ) ist es, eine reproduzierbare Anbindung zu Beginn des Pulses zu erreichen. Innerhalb der Vorversuche wurden hierfür geeignete Parameter ermittelt. Analog zum Rechteckpuls betrug die Vorschubgeschwindigkeit der Laserstrahlung 500 mm/s.

### **Abfallender Puls**

Der abfallende Puls erzeugt nicht, wie die anderen Strategien, einzelne Schweißpunkte, sondern eine kontinuierliche Schweißnaht. Die Länge der Schweißnaht wird über die Schweißgeschwindigkeit und eine im Vergleich zu den anderen Strategien relativ hohe Pulsdauer bestimmt. Um für alle drei untersuchten Schweißgeschwindigkeiten (400 mm/s, 500 mm/s und 600 mm/s) eine Nahtlänge von 10 mm zu erreichen, musste die Pulsdauer entsprechend angepasst werden (25 ms, 20 ms und 17 ms). Es ist von besonderer Bedeutung, bereits zu Beginn des Schweißprozesses eine Anbindung beider Bleche zu erreichen. Daher wurden zunächst nur die ersten 10 % der Pulsdauer appliziert, was den Leistungsniveaus  $P_1$  und  $P_2$  entspricht (vgl. Abbildung 3-5).

### **Spike-Puls**

Für die Voruntersuchung wurde der Aufschmelzprozess des Spike-Pulses betrachtet, welcher durch das Leistungsniveau  $P_1$  bestimmt wird (vgl. Abbildung 3-6). Das Prozessfenster dieser Untersuchungen wird im Gegensatz zu den anderen Strategien zum einen durch eine aufgeschmolzene Oberseite des oberen Bleches und zum anderen durch eine aufgeschmolzene Unterseite desselben Bleches definiert. Dies ist zielführend, da zunächst die erste Phase des Pulses betrachtet wurde. Es ist zu beachten, dass für eine erfolgreiche Fügeverbindung nach dem Aufschmelzen des oberen Bleches zusätzlich der Leistungspeak ( $P_2$ ) appliziert werden muss. Es wurden drei verschiedene Pulsdauern  $\tau_P$  untersucht (2,5 ms, 5,0 ms und 10,0 ms). Darüber hinaus zeichnet sich diese Strategie dadurch aus, dass der Laserstrahl während der Emission der Strahlung nicht über die Werkstückoberfläche bewegt wird, wodurch die Vorschubgeschwindigkeit für die Bearbeitung keine wesentliche Rolle spielt.

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen werden in Abbildung 5-2 vorgestellt. Die untersuchten Parameterkombinationen und das resultierende Prozessfenster sind für jede Strategie eingezeichnet. Für den Rechteckpuls konnte beobachtet werden, dass sich die minimal notwendige Laserleistung, um das obere Blech aufzuschmelzen, nicht über den untersuchten Pulsdauer-Bereich veränderte. Im Gegensatz dazu verringerte sich mit zunehmender Pulsdauer die Laserleistung, bei der ein Durchschweißen beider Bleche festgestellt werden konnte (vgl. Abbildung 5-2 a)). Für den geformten Puls und den Spike-Puls konnte ein ähnlicher Zusammenhang festgestellt werden. Das Prozessfenster übersteigt bei dem geformten Puls für die kürzeste Pulsdauer von 1 ms die maximale Pulsleistung der Laserstrahlquelle von 4 kW (vgl. Abbildung 5-2 b)). Die resultierenden Laserleistungen sind für den Spike-Puls deutlich

geringer, da bei diesem nur das Aufschmelzen des oberen Bleches berücksichtigt wurde (vgl. Abbildung 5-2 d)). Die Ergebnisse des abfallenden Pulses unterscheiden sich grundlegend von denen der übrigen Strategien. Mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit konnte dort auch die Zunahme der erforderlichen Laserleistung festgestellt werden (vgl. Abbildung 5-2 c)).

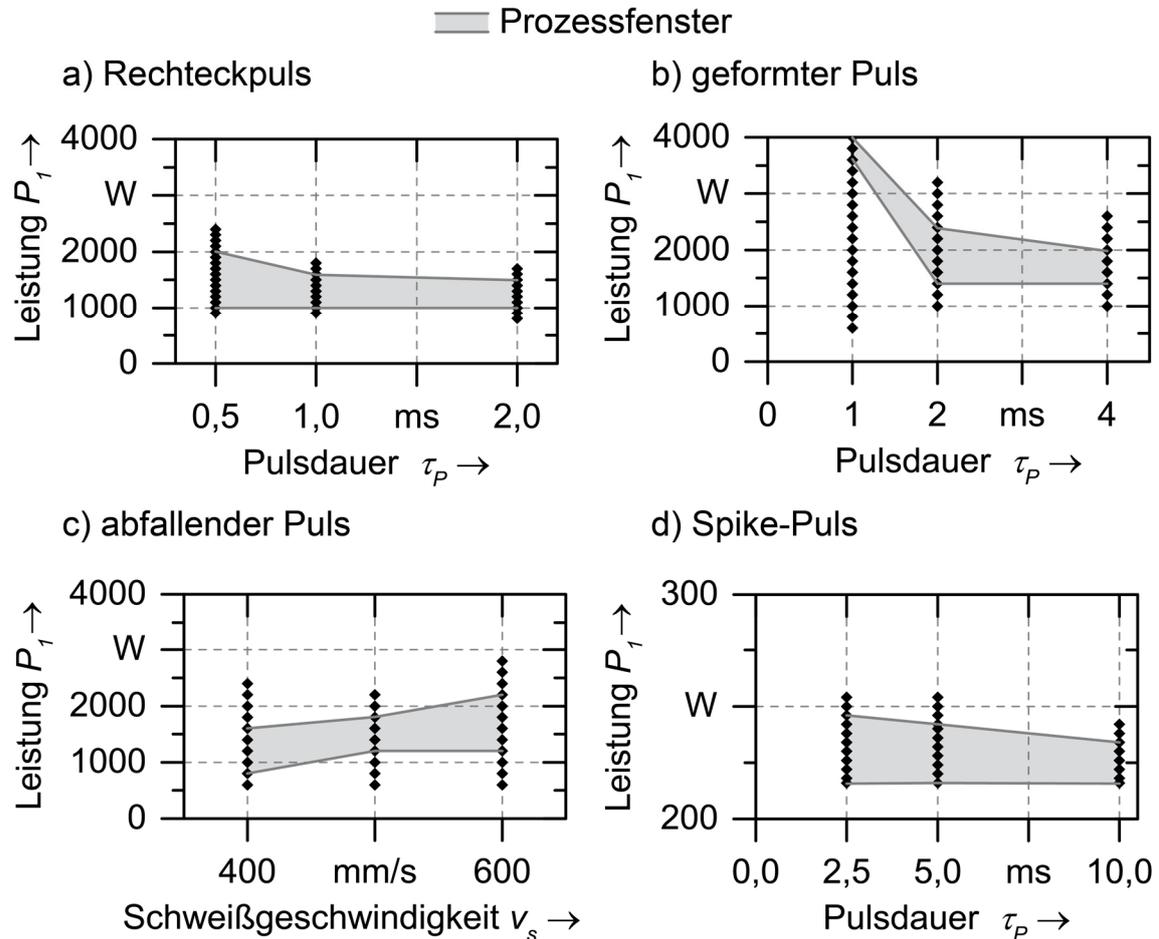


Abbildung 5-2: Ergebnisse der Voruntersuchungen für die vier Schweißstrategien; die analysierten Parameter und das resultierende Prozessfenster sind grau markiert; das Prozessfenster wurde für a) – c) über das Durchschweißen des oberen sowie beider Bleche definiert; für d) wurde das Prozessfenster über eine aufgeschmolzene Ober- und Unterseite des oberen Bleches definiert.

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen bildeten die Grundlage zur Ermittlung geeigneter Parameter, mit denen ein Vergleich der verschiedenen Schweißstrategien durchgeführt werden konnte. Hierzu wurden für alle Strategien die vollen Pulsverläufe angewendet und innerhalb des Prozessfensters die resultierenden Schweißnähte bewertet. Nach STEINBERG ET AL. (2014) beträgt die maximale Kraft, die von Hand mit jeweils zwei Fingern auf ein Blech aufgebracht werden kann, 70 N. Für die Parameter der verschiedenen Pulsdauern bzw. Schweißgeschwindigkeiten wurde jeweils

die niedrigste Leistung, mit welcher dieses Kriterium erfüllt werden konnte, ausgewählt. Anschließend wurden die jeweiligen Schweißnähte anhand von metallographischen Analysen bewertet. Die anhand der Nahtqualität und der Einschweißtiefe als am besten geeignet identifizierten Prozessparameter können der Tabelle 5-1 entnommen werden, während die entsprechenden Schliffbilder im Anhang A1 zu finden sind.

*Tabelle 5-1: Ausgewählte Parameter für den Vergleich der gepulsten Schweißstrategien; korrespondierende Schliffbilder sind in Anhang A1 zur Verfügung gestellt*

Strategie	Frequenz $f_{Rep}$	Vorschub- geschwindigkeit $v_s$	Anzahl der Pulse $N_P$	Puls- dauer $\tau_P$	Laserleistung $P$
Rechteck- puls	250 Hz	500 mm/s	5	2 ms	$P_1 = 1100 \text{ W}$
geformter Puls	125 Hz	500 mm/s	2	4 ms	$P_1 = 1700 \text{ W}$ $P_2 = 1190 \text{ W}$ $P_3 = 170 \text{ W}$
abfallender Puls	-	400 mm/s	-	25 ms	$P_1 = 1300 \text{ W}$ $P_2 = 910 \text{ W}$
Spike-Puls	-	-	10	5 ms	$P_1 = 1400 \text{ W}$ $P_2 = 280 \text{ W}$

Die Schliffbilder der metallographischen Analyse wurden auf die geometrischen Eigenschaften der Schweißnaht hin ausgewertet. Die Nahttiefe, die Anbindungsbreite sowie die Anbindungsfläche wurden ausgewertet (vgl. Abbildung 5-3). Die Anbindungsbreite repräsentiert die Schmelzbadbreite in einer Tiefe von 200  $\mu\text{m}$ . Sie ist die Grundlage der Berechnung der Anbindungsfläche. Für die Anbindungsbreite konnte keine große Variation zwischen den verschiedenen Strategien festgestellt werden. Die Werte der Anbindungsfläche unterscheiden sich jedoch deutlich in Abhängigkeit von der Pulsstrategie. Aufgrund der kontinuierlichen Naht des abfallenden Pulses konnte mit dieser Strategie mit etwa 1,5  $\text{mm}^2$  die größte Anbindungsfläche erreicht werden. Der Spike-Puls zeichnet sich durch keine Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl aus. Die resultierende Nahtgeometrie ist bei ihm kreisförmig

und im Vergleich zu den anderen Strategien mit etwa  $0,3 \text{ mm}^2$  am kleinsten. Die Einschweißtiefe lag für alle ausgewählten Parameter in einem akzeptablen Bereich von  $200 \text{ }\mu\text{m}$  bis  $400 \text{ }\mu\text{m}$ .

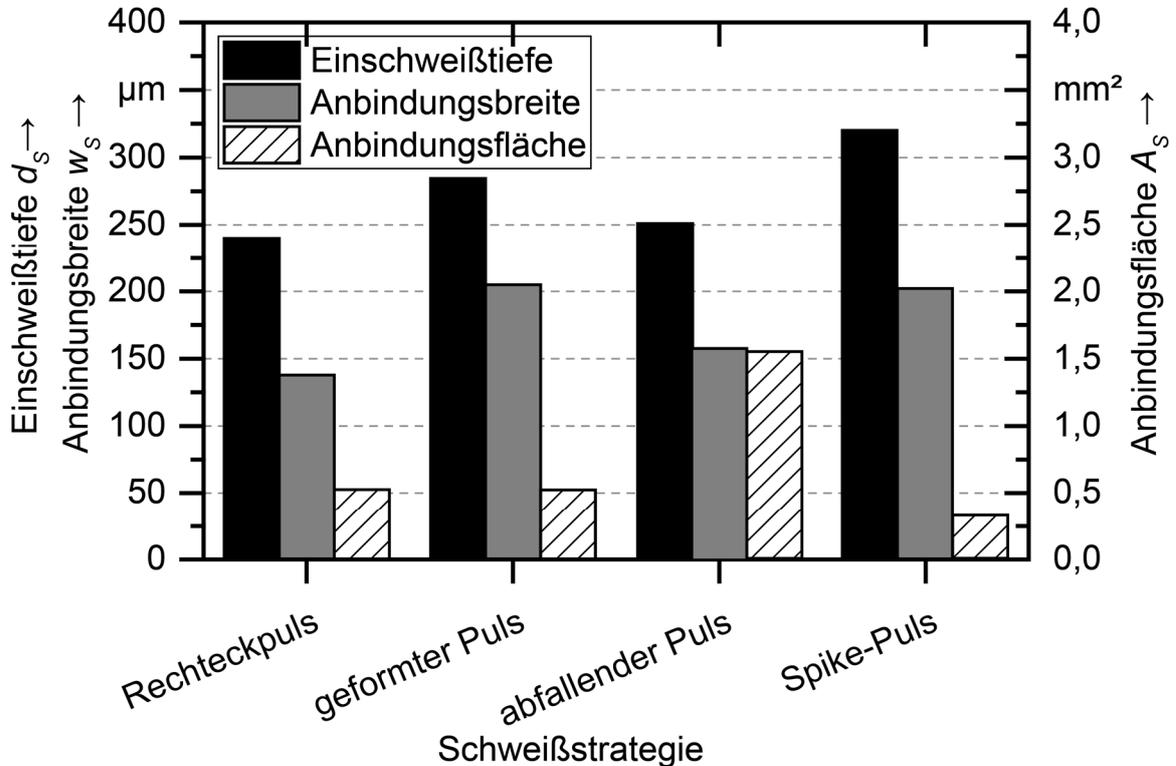


Abbildung 5-3: Ergebnisse für die Einschweißtiefe, die Anbindungsbreite und die Anbindungsfläche für die Versuchsp Parameter aus Tabelle 5-1

Die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Proben, welche mit den Parametern aus Tabelle 5-1 hergestellt wurden, sind in Abbildung 5-4 angegeben. Für jede Schweißstrategie wurden drei Proben vermessen, um eine Aussage über die stochastische Schwankung treffen zu können. Es wurden der elektrische Widerstand mittels Vier-Punkt-Leiter-Messung (vgl. Abschnitt 4.5.1) sowie die maximale Scherzugfestigkeit mittels Zugversuch (vgl. Abschnitt 4.5.2) bestimmt.

Die Messwerte des elektrischen Widerstands sind für den geformten Puls im Vergleich zu den anderen Werten geringfügig größer. Für die anderen Strategien kann angesichts der Streuung der Messwerte keine Aussage getroffen werden. Auch die Proben, welche mittels Spike-Puls hergestellt wurden, weisen trotz der geringeren Anbindungsfläche vergleichbare Widerstandswerte auf. Insgesamt liegen alle gemessenen Werte in einem Bereich zwischen  $R_x = 1,25 \text{ m}\Omega$  und  $R_x = 1,62 \text{ m}\Omega$ . Die maximale Scherzugkraft der Proben, welche mittels abfallendem Puls verschweißt wurden, ist mit etwa  $0,8 \text{ kN}$  deutlich größer als die gemessenen Werte der Proben,

welche den anderen Strategien zugeordnet werden können (0,2–0,3 kN). Dieser Effekt ist auf die deutlich größere Anbindungsfläche zurückzuführen.

Die vergleichsweise große Anbindungsfläche hat allerdings keine Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit zur Folge. Weiterhin ist die Pulsenergie des abfallenden Pulses mit 27,6 J deutlich größer als die der anderen Strategien. Da angenommen wird, dass die Pulsenergie einen proportionalen Zusammenhang mit dem Energieeintrag in das Werkstück aufweist, wird diese Strategie nicht zur Kontaktierung von zylindrischen Zellen empfohlen. Im Gegensatz dazu kann dem Spike-Puls die geringste Pulsenergie zugeordnet werden ( $E_{P, Spike-Puls} = 1,5 \text{ J}$ ,  $E_{P, Rechteckpuls} = 2,2 \text{ J}$ ,  $E_{P, geformter Puls} = 2,9 \text{ J}$ ). Daraus folgt, dass mittels Spike-Puls der Energieeintrag in das Werkstück sehr präzise über die Anzahl der Pulse gesteuert werden kann. Darüber hinaus weisen die mittels Spike-Puls erstellten Proben in Abbildung 5-4 die geringste Streuung auf, was auf eine höhere Reproduzierbarkeit des Prozesses hinweisen könnte. Aus den genannten Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit der Spike-Puls zur Kontaktierung der Zellen ausgewählt und er wird im nachfolgenden Abschnitt auf der Basis einer Studie detaillierter untersucht.

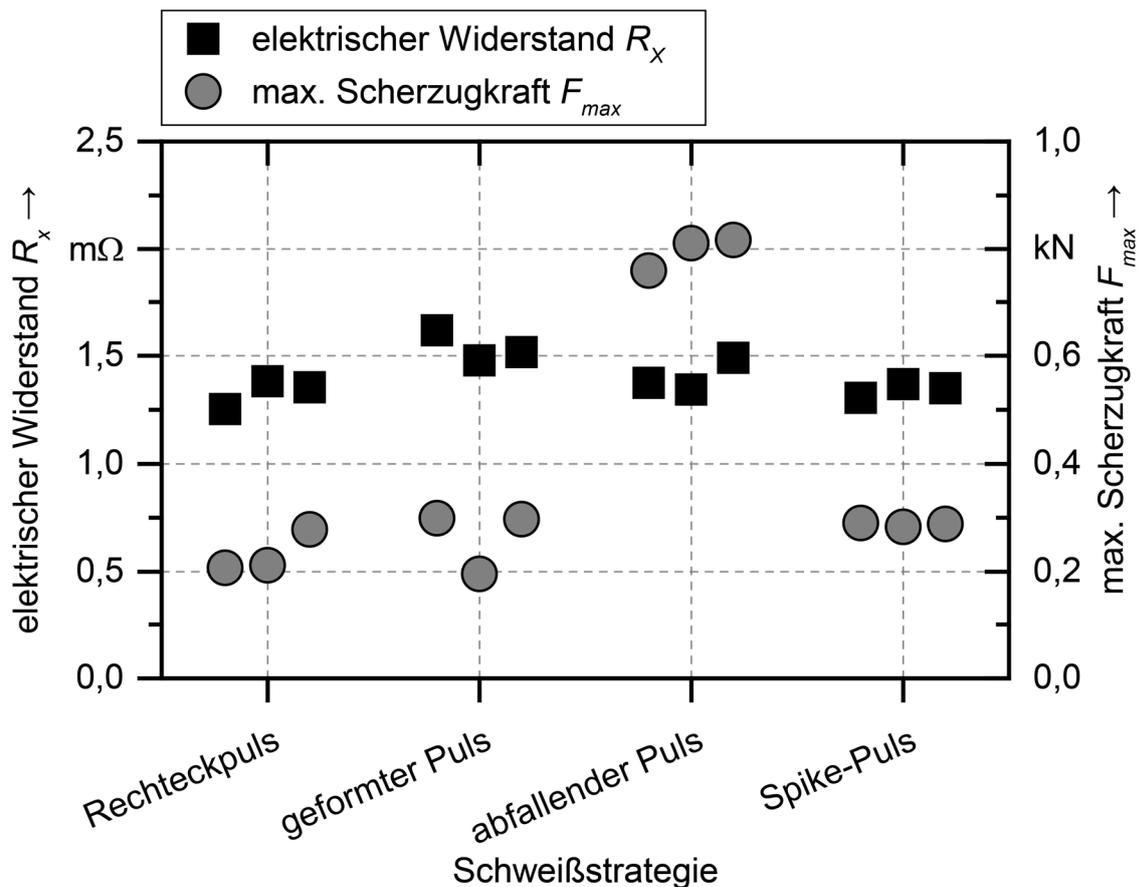


Abbildung 5-4: Ergebnisse der elektrischen und mechanischen Eigenschaften für die Versuchsparameter aus Tabelle 5-1

### 5.3 Prozessuntersuchungen zum Schweißen mittels Spike-Puls

In Abschnitt 5.2 wurden verschiedene Pulsstrategien miteinander verglichen und der Spike-Puls für die weitere Untersuchung als bevorzugte Lösung ausgewählt. Inhalt dieses Abschnitts ist eine im Rahmen der Arbeit durchgeführte Parameterstudie zur Ermittlung von geeigneten Parametern für die Kontaktierung von zylindrischen Batteriezellen.

Zunächst wurden die zu untersuchenden Prozessparameter festgelegt. In Abbildung 5-5 ist der Verlauf des Spike-Pulses veranschaulicht. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Abschnitt 5.2 wurden innerhalb dieser Parameterstudie alle in Abbildung 5-5 aufgeführten Prozessgrößen variiert. Analog zu den Voruntersuchungen wurde der Arbeitsabstand in Relation zum Fokusabstand um 2,5 mm vergrößert.

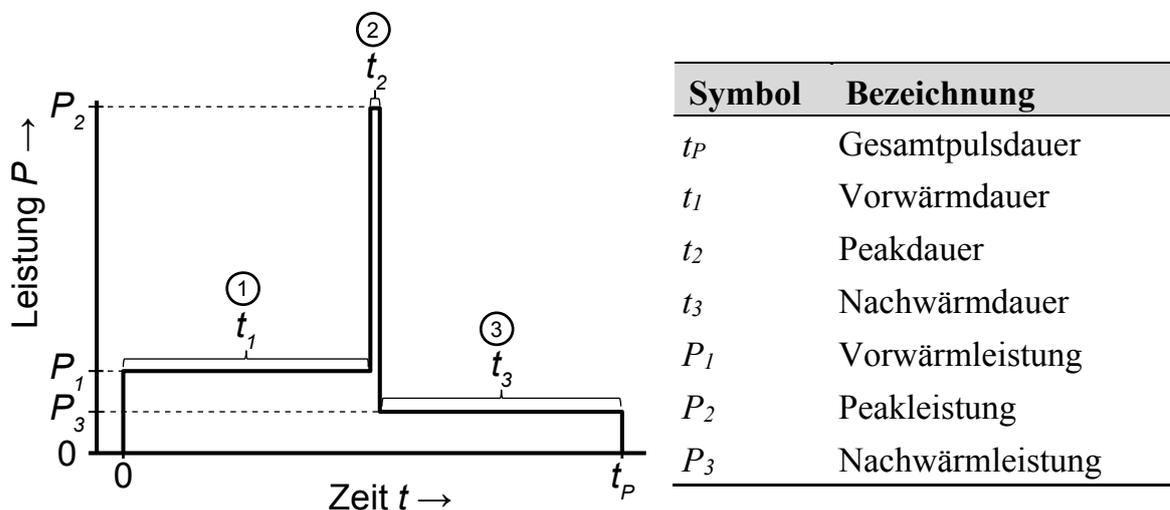


Abbildung 5-5: Zeitverlauf des Spike-Pulses mit allen untersuchten Prozessgrößen

Angeht die Vielzahl an möglichen Parameterkombinationen musste eine systematische Vorgehensweise gewählt werden. Mittels statistischer Versuchsplanung (DoE) wurde ein D-optimaler Versuchsplan generiert, der die in Tabelle 5-2 aufgeführten Werte der Prozessparameter enthält. Es wurde darauf geachtet, nicht zielführende Parameterkombinationen auszuschließen. So wurden beispielsweise die größten Werte der Nachwärm- und Vorwärmleistungen nicht mit den höchsten Werten der entsprechenden Pulsdauern kombiniert, da dies durchgeschweißte Proben zur Folge gehabt hätte. Der finale Versuchsplan ist in Anhang A2 aufgeführt und enthält insgesamt 37 Versuchspunkte. Als Zielgrößen wurden die Einschweißtiefe  $d_s$  und die Anbindungsbreite  $w_s$  definiert und mittels metallographischer Analyse ausgewertet. Die Einschweißtiefe stellt die wichtigste Größe zur Bewertung eines reproduzierbaren Schweißprozesses dar. Ein Wert von  $d_s \geq 400 \mu\text{m}$  repräsentiert eine durchgeschweißte Naht, wohingegen ein Wert von  $d_s \leq 200 \mu\text{m}$  keine Anbindung der beiden

Bleche impliziert. Gleichzeitig wurde die Schweißnahtqualität der entstandenen Verbindungen bewertet.

*Tabelle 5-2: Werte der Prozessparameter, die im Rahmen des Versuchsplans untersucht wurden; der vollständige Versuchsplan ist in Anhang A2 zu finden*

Parameter	Einheit	Werte						
$t_P$	ms	5	10	15	20			
$P_1$	W	150	180	210	230	240	250	270
$t_1$	ms	$0,5 \cdot t_P$	$0,75 \cdot t_P$					
$P_2$	W	700	900	1100				
$t_2$	ms	0,05	0,1	0,15	0,2			
$P_3$	W	$0,5 \cdot P_1$	$1 \cdot P_1$					
$t_3$	ms	$t_P - t_1 - t_2$						

Die hohe Anzahl an Einflussgrößen erschwert die Detektion von Korrelationen zwischen den Parametern und den Zielgrößen. Aus diesem Grund wurde eine *multiple lineare Regression* angewendet, um den Einfluss der unabhängigen Variablen auf die Zielgrößen zu untersuchen. Der Parameter  $t_P$  wurde bei der Analyse aufgrund einer sehr starken Korrelation zwischen  $t_P$  und  $P_1$  ausgeschlossen. Außerdem wurden alle Versuchspunkte, die entweder einen Wert von  $d_S \geq 400 \mu\text{m}$  oder einen Wert von  $w_S = 0 \mu\text{m}$  zur Folge hatten, nicht betrachtet.

In Abbildung 5-6 sind die Effekte der Einflussgrößen auf die Einschweißtiefe und die Anbindungsbreite visualisiert. Die Diagramme beinhalten die maximal erreichte Veränderung der Zielgröße in Bezug auf ihren Mittelwert unter Variation der entsprechenden Parameter. Auf Basis der Auswertung konnte für die Parameter  $t_1$  und  $P_3$  kein Einfluss auf die Zielgrößen festgestellt werden. Die Anbindungsbreite wird am stärksten durch die Vorwärmleistung beeinflusst. Zudem ist die Peakdauer von Relevanz. Demgegenüber kann innerhalb des Fehlers kaum ein Einfluss der Peakleistung erkannt werden. Dieses Ergebnis erklärt sich durch den Schmelzvorgang zu Beginn des Spike-Pulses. Höhere Vorwärmenergien führen zu einem größeren aufgeschmolzenen Bereich und damit zu einer größeren Anbindungsbreite.

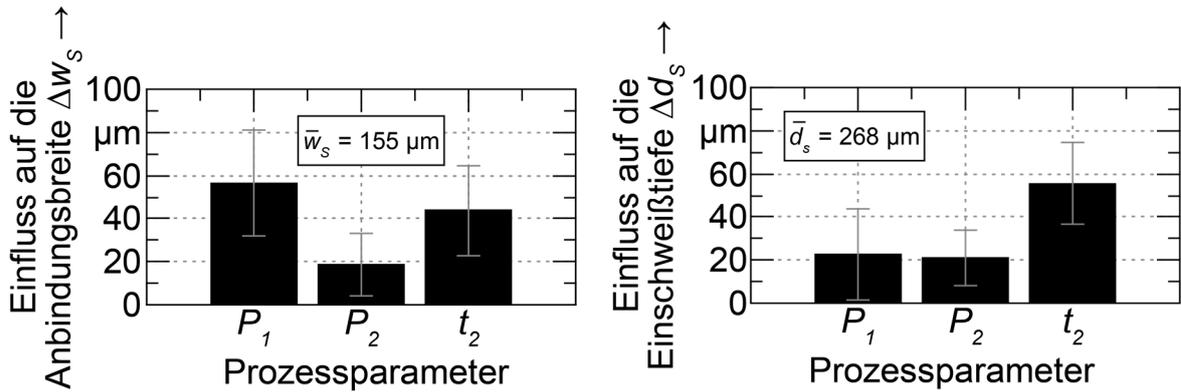


Abbildung 5-6: Einfluss der Prozessparameter auf die beiden Zielgrößen Anbindungsbreite (links) und Einschweißtiefe (rechts)

In Bezug auf die Einschweißtiefe ist zu erkennen, dass die Peakdauer den größten Einfluss auf den Wert von  $d_s$  hat. Zudem konnte ein Einfluss der Peakleistung festgestellt werden. Demgegenüber ist innerhalb des Fehlers für die Vorwärmleistung kein Einfluss zu erkennen. Dieses Ergebnis kann über den Verlauf des Spike-Pulses erklärt werden. Da während der Peak-Phase eine Dampfkapillare generiert wird, deren Eigenschaften maßgeblich durch die Peak-Energie  $E_2$  ( $E_2 = t_2 \cdot P_2$ ) bestimmt werden, führen höhere Peak-Energien zu größeren Einschweiß-tiefen. In Abbildung 5-7 ist das mittels linearer Regression ermittelte empirische Modell der Abhängigkeit zwischen Peak-Energie und Einschweißtiefe, inklusive der Konfidenzintervalle, gezeigt. Aus dem Diagramm folgt, dass für eine Einschweißtiefe von 250–300  $\mu\text{m}$  eine Peak-Energie von ca. 75–175 mJ appliziert werden muss.

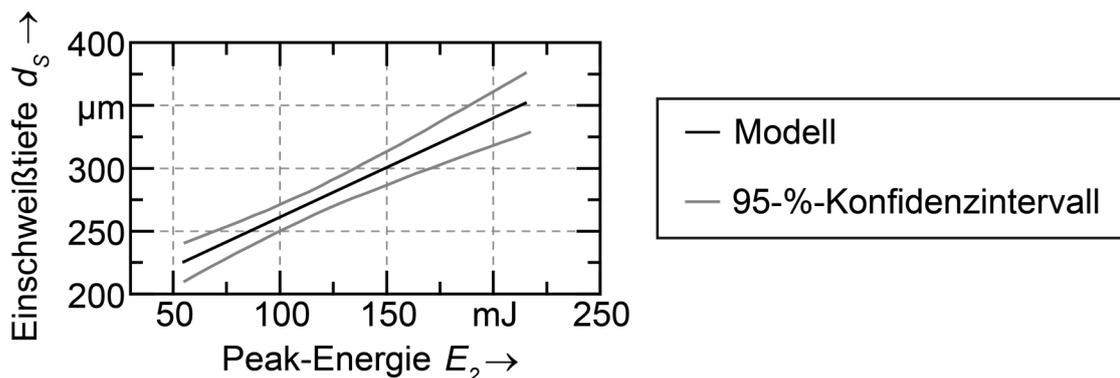


Abbildung 5-7: Empirisches Modell der Einschweißtiefe in Abhängigkeit von der Peak-Energie mit 95%-Konfidenzintervall

Die Schweißnahtqualität wurde ebenfalls mittels metallographischer Analyse ermittelt. Hierbei wurde das Ergebnis hinsichtlich einer homogenen Naht ohne Poren bewertet. Es konnte festgestellt werden, dass bei einer reduzierten Nachwärmleistung  $P_3$  vermehrt Poren innerhalb der Naht auftraten. In Abbildung 5-8 ist links beispiel-

haft ein Schliffbild einer Probe mit Pore zu sehen. Die korrespondierenden Prozessparameter sind in Abbildung 5-8 rechts aufgeführt. Die Porenbildung kann dadurch erklärt werden, dass bei größeren Nachwärmleistungen das Schmelzbad später erstarrt, sodass mehr Zeit zum Ausgasen der Poren besteht.

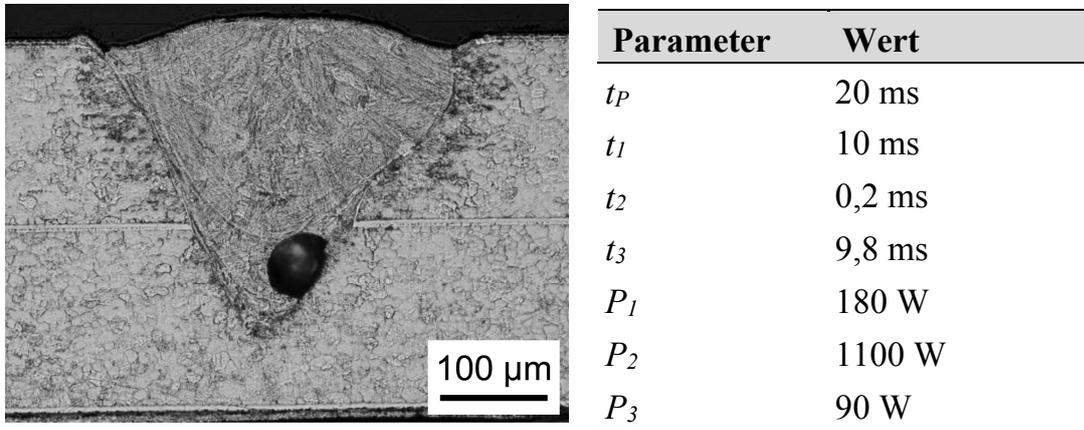


Abbildung 5-8: Schliffbild einer Probe mit Pore (links) und die korrespondierenden Prozessparameter (rechts)

Auf Basis der ermittelten Einschweißtiefe und der Nahtqualität wurden drei verschiedene Parameterkombinationen für eine Untersuchung der Reproduzierbarkeit ausgewählt. Diese Parameter sind in Tabelle 5-3 aufgeführt, während in Abbildung 5-9 die entsprechenden Schliffbilder zu sehen sind. Um sicherzustellen, dass bei der Kontaktierung der Batteriezellen keine Sicherheitsrisiken aufgrund von durchgeschweißten Verbindungen auftreten, wurden für jeden Parametersatz 500 Schweißpunkte appliziert und mittels Mikroskopie auf ein Durchschweißen hin untersucht. Die entsprechenden Mikroskopieaufnahmen sind in Anhang A3 zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden jeweils zehn Schliffbilder angefertigt und die resultierende Einschweißtiefe analysiert.

Tabelle 5-3: Anhand der Schliffbilder als am besten geeignet identifizierte Prozessparameter; korrespondierende Schliffbilder sind in Abbildung 5-9 gezeigt

Nummer	$t_P$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
1	10 ms	5 ms	0,1 ms	4,9 ms	230 W	1100 W	230 W
2	10 ms	5 ms	0,1 ms	4,9 ms	250 W	1100 W	250 W
3	10 ms	5 ms	0,2 ms	4,8 ms	240 W	700 W	240 W

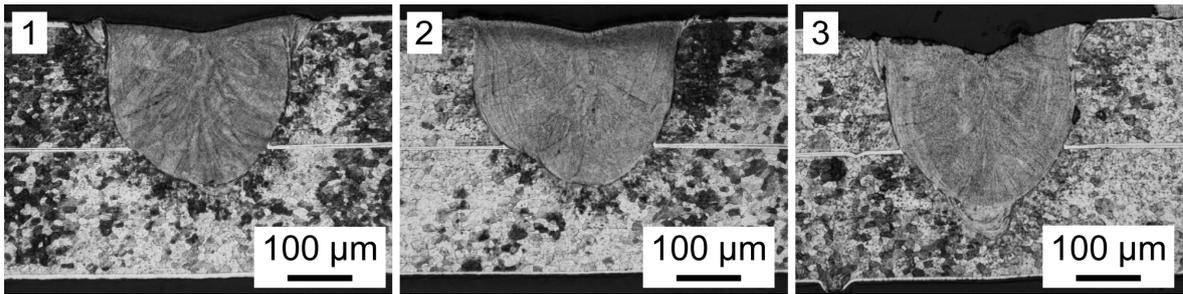


Abbildung 5-9: Schliffbilder der als am besten geeignet identifizierten Prozessparameter (Prozessparameter gemäß Tabelle 5-3)

Die Ergebnisse der Schliffbilderanalyse (Abbildung 5-10) zeigen, dass für die Parameterkombinationen Nummer 2 und 3 durchgeschweißte Verbindungen auftraten. Für die Parameterkombination Nummer 1 lagen die erreichten minimalen Nahttiefen zwischen 250 µm und 300 µm. Zudem konnte bei keinem der 500 Schweißpunkte dieser Parameterkombination eine Durchschweißung nachgewiesen werden (vgl. Anhang A3). Dementsprechend kann die Parameterkombination Nummer 1 als geeignet für die Kontaktierung von zylindrischen Zellen aufgefasst werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde dieser Parametersatz angewendet, um unter Berücksichtigung der notwendigen Anbindungsfläche und der maximalen thermischen Belastung die Batteriezellen zu verschweißen.

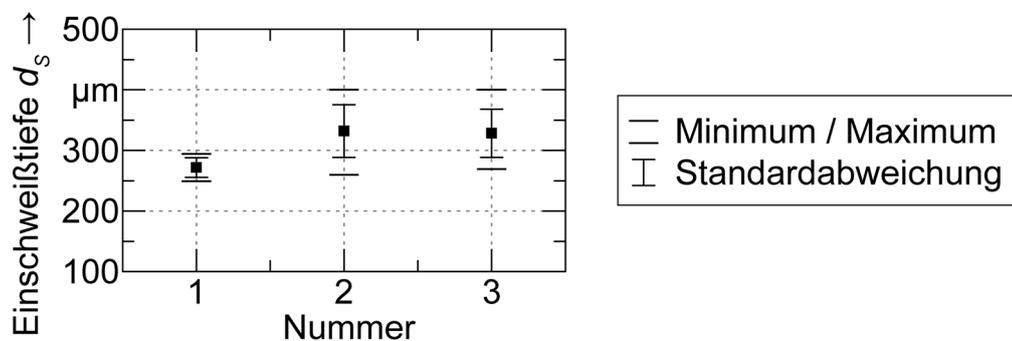


Abbildung 5-10: Werte der Nahttiefe von jeweils 10 Schliffproben der Parameterkombinationen 1 bis 3; minimaler und maximaler Wert sowie die Standardabweichungen sind angegeben (Prozessparameter gemäß Tabelle 5-3)

## **5.4 Elektrische und mechanische Auslegung der Anbindungsfläche**

### **5.4.1 Vorgehensweise**

In Abschnitt 5.3 wurde mittels experimentellen Untersuchungen eine geeignete Parameterkombination ermittelt, um zylindrische Zellen mittels Laserstrahlung zu fügen. Jeder Schweißpuls erzeugt eine annähernd kreisförmige Anbindungsfläche, mit der die Zelle und das Ableiterblech verbunden werden. Für eine funktionsfähige Zellverbindung muss sichergestellt sein, dass die elektrischen und mechanischen Anforderungen erfüllt sind. Hierbei sind die Größe und die Geometrie der Anbindungsfläche die entsprechenden Freiheitsgrade. Während in SCHMIDT ET AL. (2014) eine Methode zur Optimierung der Anbindungsgeometrie vorgestellt wurde, ist innerhalb dieser Arbeit die Forschungsfrage zu beantworten, welche Anbindungsfläche hinsichtlich der Anforderungen mindestens notwendig ist. Es ist zu beachten, dass die durch den Schweißprozess in das Werkstück eingebrachte Wärmemenge proportional mit der Anbindungsfläche ansteigt. Es ist daher nicht nur im Hinblick auf die Prozesszeit, sondern auch aufgrund der temperatursensiblen Zellkomponenten eine möglichst geringe Anbindungsfläche zu bevorzugen. Die innerhalb dieser Arbeit verwendete Schweißstrategie erzeugt nahezu identische Punktkontakte, sodass die Anbindungsfläche ein ganzzahliges Vielfaches der Anbindungsfläche eines Schweißpunkts ausmacht. Innerhalb dieses Abschnitts werden daher Untersuchungen zu der notwendigen Anzahl an Schweißpunkten für die Erfüllung der Anforderungen vorgestellt. In Abschnitt 2.2.5 wurden die Anforderungen an die elektrische Kontaktierung der Zellen diskutiert. Die Kriterien hinsichtlich der Funktion werden in den folgenden Abschnitten herangezogen, um die Anforderungen abzuleiten.

### **5.4.2 Geometrische Anordnung der Schweißpunkte**

Zunächst wurde die geometrische Verteilung der Schweißpunkte auf den Zellpolen betrachtet. Ziel war es, eine optimale Geometrie der Anbindungsfläche für die nachfolgenden Versuche festzulegen. Hierfür wurde die von SCHMIDT ET AL. (2014) entwickelte und in Abschnitt 3.3 beschriebene Methode zur Anordnung von Schweißpunkten an die vorliegende Problemstellung angepasst und auf sie angewendet. In Abbildung 5-11 ist das basierend auf SCHMIDT ET AL. (2014) abgeleitete Simulationsmodell veranschaulicht. Ein Zylinder repräsentiert die Batteriezelle und ein quaderförmiger Körper mit einer Dicke von 0,2 mm das Ableiterblech. Die ringförmige Zylinderfläche an der Unterseite wurde als 3A-Stromquelle definiert und der

Querschnitt des Ableiterblechs an der rechten Seite diene als Erdung mit einem Potenzial von  $U_0 = 0 \text{ V}$ . Es wurden zehn Schweißpunkte als Zylinder mit einem Radius von  $150 \text{ }\mu\text{m}$  implementiert. Aufgrund einer elektrischen Isolation zwischen Zylinder und Ableiter kann der elektrische Stromfluss nur durch diese Elemente erfolgen. Die Koordinaten der Elemente repräsentieren die Gene des Algorithmus und können analog zu SCHMIDT ET AL. (2014) über den Genetischen Algorithmus verändert werden. Die Zielfunktion wurde über die Differenz von  $U_1$  und  $U_0$  definiert, sodass eine möglichst geringe Potentialdifferenz dem Optimum entspricht.

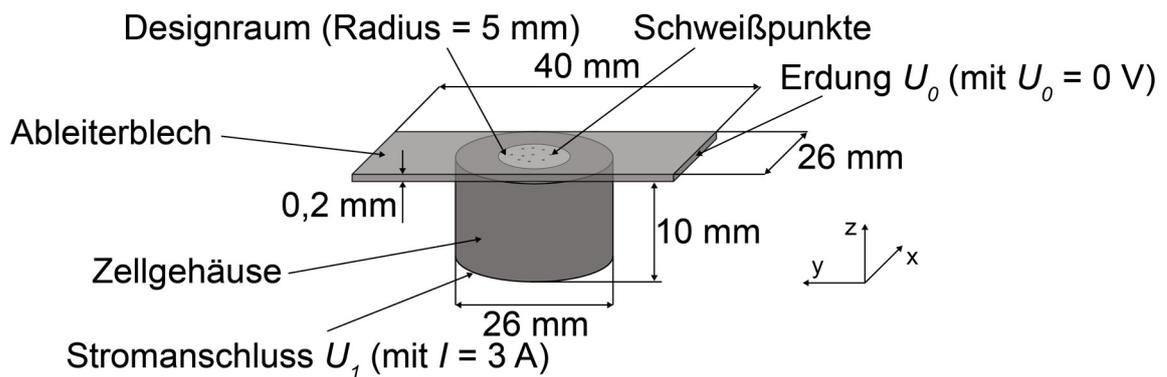


Abbildung 5-11: Schematische Darstellung der Geometrie des Simulationsmodells für die Optimierung der Schweißpunkteverteilung

Eine Restriktion bei der Anordnung ist durch die Notwendigkeit einer mechanischen Spannvorrichtung gegeben. Diese muss das Ableiterblech über eine Spannkraft auf der Zelle fixieren. Aufgrund der zylindrischen Zellgeometrie wird das Spannelement in der Regel ringförmig ausgeführt, sodass die Schweißpunkte innerhalb des Spannelements angeordnet werden müssen. Dies wurde im Modell über einen kreisförmigen Designraum mit einem Radius von  $5 \text{ mm}$  realisiert. Für eine detailliertere Beschreibung der Methode wird auf SCHMIDT (2015, S. 83 ff.) verwiesen. In Tabelle 5-4 sind die Einstellungen der Global Optimization Toolbox in *MATLAB* aufgeführt, die für die Optimierungsmethode angewendet wurden.

Tabelle 5-4: Einstellungen der Global Optimization Toolbox in MATLAB für die Optimierungsmethode

Parameter	Wert
Populationstyp	double vector
Populationsgröße	400
Fitness-Skalierungsfunktion	fitscalingrank
Elitengröße	10
Selektionsfunktion	stochastic uniform
Rekombinationsfunktion	crossover scattered
Mutationsfunktion	mutation uniform
max. Anzahl an Generationen	400
max. Anzahl an Generationen ohne Veränderung	150
Abbruch-Zielfunktionswert	0,15

Die Ergebnisse der Optimierung bezüglich einer minimalen Potenzialdifferenz zwischen  $U_1$  und  $U_0$  sind in Abbildung 5-12 gezeigt. In der Abbildung sind auf der linken Seite a) das beste Ergebnis der ersten Generation und auf der rechten Seite b) das Optimum, welches nach 315 Generationen erreicht wurde, gezeigt. Der elektrische Widerstand konnte zwischen diesen beiden Individuen um 14 % auf 644,6 m $\Omega$  reduziert werden. Die Schweißpunkteverteilung des Optimums entsprach einem Kreis, da sich die Schweißpunkte entlang des Rands des Designraums verteilten.

a) Generation 1

b) Optimum nach 315 Generationen

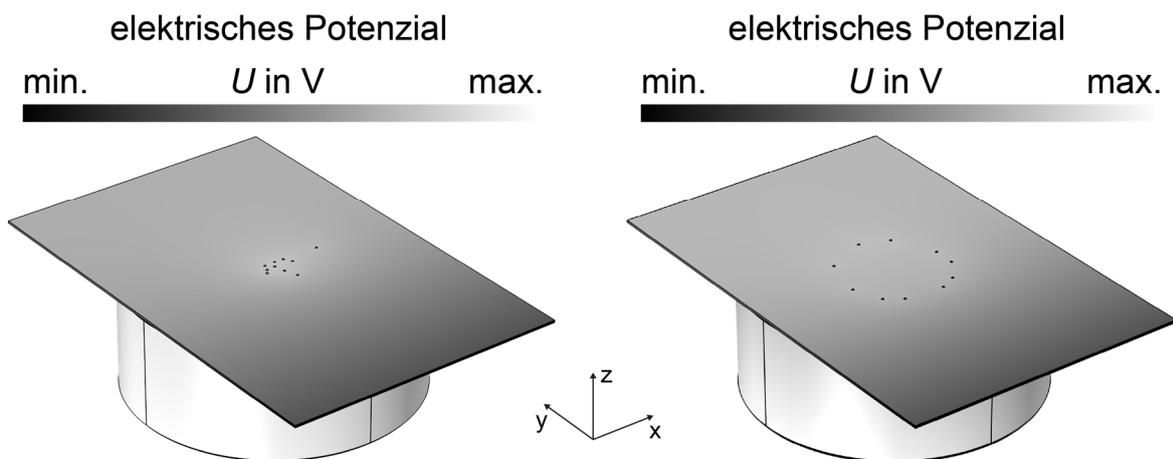


Abbildung 5-12: FE-Modelle der Ergebnisse der Optimierung der Schweißpunkteverteilung; a) bestes Ergebnis der ersten Generation; b) Optimum nach 315 Generationen

Aus dem Ergebnis der Optimierung in Abbildung 5-12 b) kann ein Kreis als geeignete Anordnung der Schweißpunkte abgeleitet werden. Dementsprechend wird im weiteren Verlauf die Kreisgeometrie angewendet, um die Anforderungen an die Anbindungsfläche zu ermitteln. In Abbildung 5-13 ist die entsprechende Probengeometrie schematisch visualisiert. Als variable Parameter für die weiteren Untersuchungen ergibt sich damit, neben der Anzahl der Schweißpunkte  $N_P$ , auch der Kreisdurchmesser  $d_P$ . Aufgrund der Größe der Zellpole konnte für  $d_P$  ein maximaler Wert von 10 mm festgelegt werden. Darüber hinaus wurden zwei weitere Durchmesser untersucht. In den nachfolgenden Abschnitten soll jeweils die minimale Anzahl der notwendigen Schweißpunkte ermittelt werden, um die elektrischen und mechanischen Anforderungen bei einem Kreisdurchmesser von 3 mm, 5 mm und 10 mm zu erfüllen. In Tabelle 5-5 sind die untersuchten Werte für die Anzahl der Schweißpunkte aufgeführt. Aufgrund des geringeren Kreisumfangs ist es bei  $d_P = 3$  mm nicht möglich, 40 Schweißpunkte zu applizieren, ohne eine Überlappung der Punkte zu erzeugen. Um einen Vergleich mit dem konventionellen Verfahren Widerstandspunktschweißen zu ermöglichen, wurden auch Proben mit diesem Verfahren hergestellt. Die entsprechenden Prozessparameter sind in Anhang A4 aufgeführt.

Tabelle 5-5: *Untersuchte Werte für die Anzahl der Schweißpunkte  $N_P$  für die verschiedenen Kreisdurchmesser  $d_P$*

<b>Kreisdurchmesser <math>d_P</math></b>	<b>untersuchte Anzahl der Schweißpunkte <math>N_P</math></b>					
3 mm	2	3	6	9	18	
5 mm	2	3	6	9	18	40
10 mm	2	3	6	9	18	40

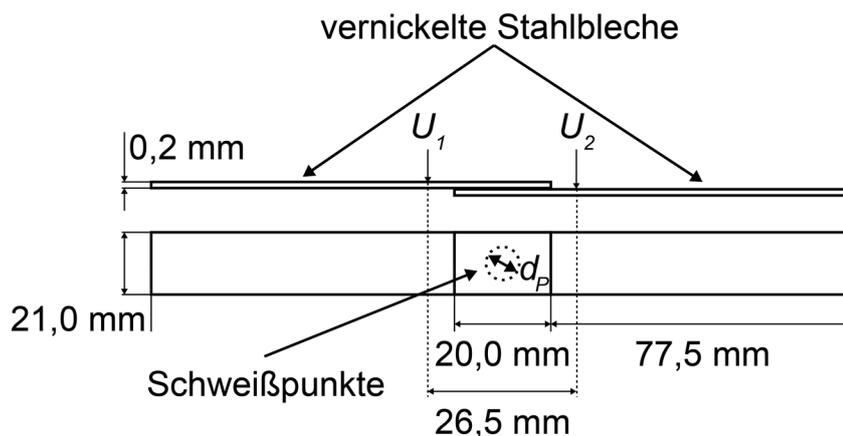


Abbildung 5-13: *Schematische Darstellung der Probengeometrie für die Auslegung der Anbindungsfläche; die variablen Größen sind die Anzahl der Schweißpunkte  $N_P$  und der Durchmesser des Kreises  $d_P$ ; für die Vier-Punkt-Leiter-Messung wurde der Spannungsabfall  $U_x = U_2 - U_1$  gemessen*

### 5.4.3 Elektrischer Widerstand

Für die Untersuchung des elektrischen Widerstands gemäß Abschnitt 4.5.1 wurden für jede Kombination aus Kreisdurchmesser und Anzahl der Schweißpunkte jeweils drei Proben angefertigt. Dabei wurden die Schweißparameter mit der Nummer 1 aus Tabelle 5-3 unverändert angewendet.

Für die Definition der Anforderung sind aus der Literatur keine Vorgaben bekannt. Wie in Abschnitt 2.2.5 erläutert, muss sichergestellt sein, dass die elektrische Verlustleistung die Effizienz des Speichersystems nicht beeinflusst und dass die Erwärmung an den Kontaktstellen zu keiner signifikanten Temperaturänderung innerhalb der Zelle führt. Die widerstandspunktgeschweißten Referenzproben können für die Definition der Anforderung herangezogen werden, da dadurch sichergestellt ist, dass für den vorliegenden Anwendungsfall die elektrische Leitfähigkeit in Bezug auf den Referenzprozess nicht verschlechtert wird. Die Anforderung gilt demnach als erfüllt, wenn der gemessene elektrische Widerstand der lasergeschweißten kleiner oder gleich dem Widerstand der WPS-Proben ist.

In Abbildung 5-14 sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Widerstandsmessungen für die laserstrahlgeschweißten Proben sowie für die WPS-Referenzproben gezeigt. Mit zunehmender Anzahl an Schweißpunkten ist eine Reduzierung des elektrischen Widerstands zu erkennen. Der Verlauf des Widerstands ist abfallend mit steigender Anzahl an Schweißpunkten und konvergiert für eine hohe Anzahl an Schweißpunkten gegen einen Wert, welcher vom verwendeten Kreisdurchmesser abhängig ist. Dabei ist ein großer Kreisdurchmesser für einen kleinen Widerstand zu bevorzugen. Die Standardabweichung der Messwerte ist ebenfalls geringer bei einer großen Anzahl von Schweißpunkten. Dies kann über stochastische Schwankungen der Anbindungsfläche eines Schweißpunkts erklärt werden. Bei einer hohen Anzahl an Schweißpunkten gleichen sich diese Schwankungen über die verschiedenen Punkte aus. Für die widerstandspunktgeschweißten Proben wurde ein Wert von  $0,76 \pm 0,03 \text{ m}\Omega$  gemessen. Bei einem Kreisdurchmesser von 3 mm kann dieser Wert aufgrund der vorzeitigen Konvergenz nicht erreicht werden. Durch eine Interpolation der Messpunkte kann gefolgert werden, dass bei einem Kreisdurchmesser von 5 mm ab 20 Punkten und für  $d_P = 10 \text{ mm}$  bereits ab einer Anzahl von 8 Punkten eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit sichergestellt werden kann.

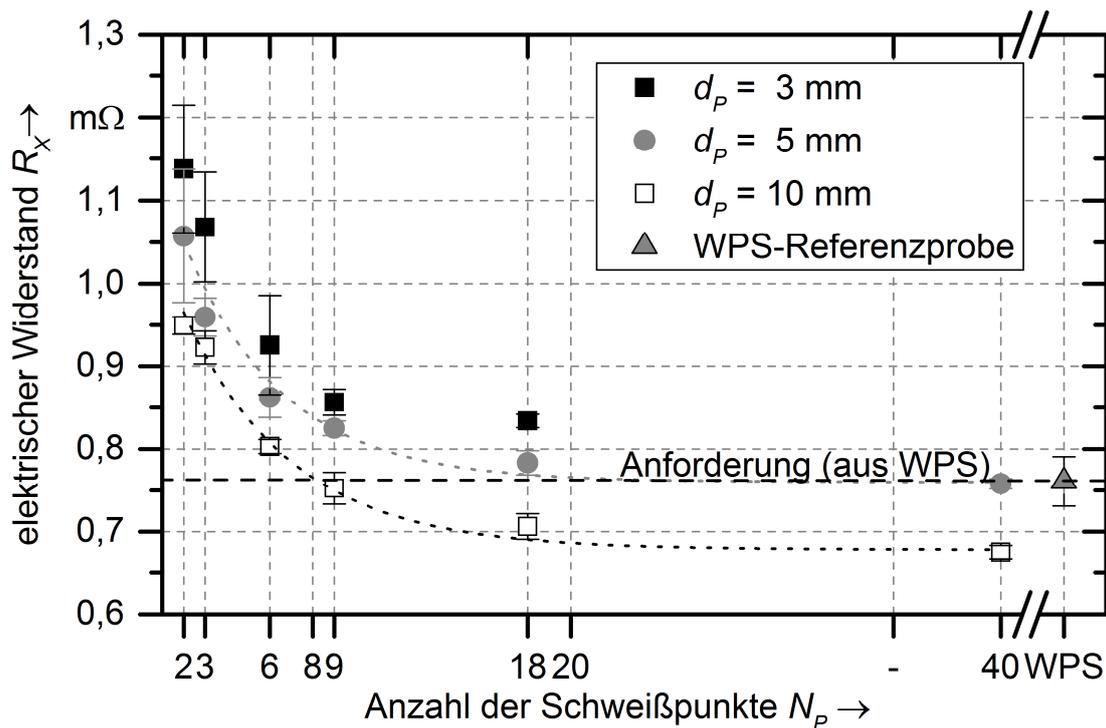


Abbildung 5-14: Gemessene Verbindungswiderstände  $R_X$  der Proben gemäß Abschnitt 4.5.1 in Abhängigkeit von der Anzahl der Schweißpunkte  $N_P$ , berechnet über die Potentialdifferenz  $U_X$  (vgl. Abbildung 5-13) für die drei Schweißpunktdurchmesser  $d_P$ ; die Fehlerbalken stehen für die Standardabweichung vom Mittelwert der Messungen; die Ergebnisse der WPS-Referenzproben definieren die Anforderung für den zu erreichenden elektrischen Widerstand

#### 5.4.4 Mechanische Zugfestigkeit

Für die Untersuchung der mechanischen Zugfestigkeit (vgl. Abschnitt 4.5.2) wurden dieselben Proben wie für die Untersuchung des elektrischen Widerstands gemäß Abschnitt 5.4.3 verwendet. Dementsprechend standen für jeden Parametersatz drei Proben zur Verfügung. Darüber hinaus wurden auch die drei Proben vermessen, die mittels Widerstandspunktschweißen gefügt wurden.

Für die Definition der Anforderung kann die in Abschnitt 2.2.5 beschriebene Norm UN38.3 herangezogen werden. Der dieser Norm zugehörige Einzeltest T.4: Schlag beinhaltet die Belastung des Speichers mit einer Beschleunigung von 150·g. Da der Zellverbinder in der Regel fest mit dem Zellhalter verbunden ist und die Zelle aufgrund von fertigungsbedingten Toleranzen ein Spiel innerhalb des Zellhalters aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die Zelle bei einem Stoß beschleunigt wird. Daraus kann die notwendige Festigkeit der Verbindung über die Masse einer Zelle (86 g) wie folgt bestimmt werden:

$$F_{min} = 150 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 86 \text{ g} \approx 127 \text{ N} \quad (5-1)$$

In Abbildung 5-15 sind die maximal erreichbaren Scherzugkräfte der Versuchsproben aus Abschnitt 5.4.3 in Abhängigkeit von der Anzahl der Schweißpunkte für alle drei Kreisdurchmesser gezeigt. Da die Messwerte aller Durchmesser jeweils für einen Wert von  $N_P$  übereinander liegen, kann gefolgert werden, dass die Zugfestigkeit nicht vom Kreisdurchmesser, sondern allein von der Anbindungsfläche abhängig ist. Die Messwerte weisen einen degressiven Verlauf mit steigender Anzahl an Schweißpunkten auf. Die Anforderung an die minimale Zugkraft von 127 N ist für alle Durchmesser bereits ab einem Wert von  $N_P = 6$  erfüllt. Für die WPS-Referenzproben wurde mit 1015 N ein deutlich höherer Wert als bei den lasergeschweißten Proben mit der größten Anzahl an Schweißpunkten (ca. 720 N) gemessen. Diese Differenz kann auf eine größere Anbindungsfläche der WPS-Proben zurückgeführt werden.

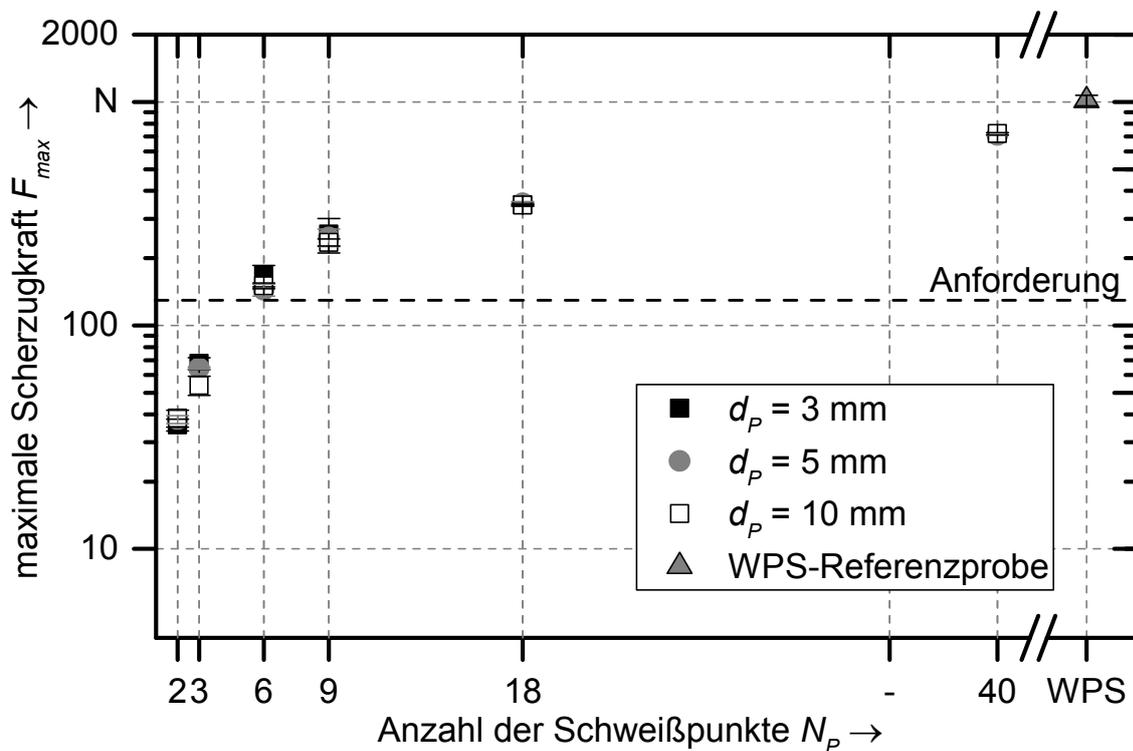


Abbildung 5-15: Gemessene maximale Scherzugkräfte  $F_{max}$  gemäß Abschnitt 4.5.2 in Abhängigkeit von der Anzahl der Schweißpunkte  $N_P$  für alle drei Schweißpunktdurchmesser  $d_P$ ; die Fehlerbalken stehen für die Standardabweichung vom Mittelwert der Messungen; die Anforderung folgt aus Norm UN38.3 T.4: Schlag

### 5.4.5 Vibrationsbeständigkeit

Für die Vermessung der Vibrationsbeständigkeit gemäß Abschnitt 4.5.3 wurden Ableiterbleche an leere Zellgehäuse geschweißt und im Vibrationsprüfstand untersucht. Die Norm *UN38.3 T.3: Schwingung* wurde in Abschnitt 2.2.5 vorgestellt und beinhaltet eine entsprechende Prüfvorschrift für die Vibrationsbeständigkeit. Die Zelle wird dabei einer Sinusschwingung mit variierender Frequenz und Amplitude ausgesetzt. Die Startfrequenz liegt bei 7 Hz mit einer maximalen Beschleunigung von  $1 \cdot g$  und einer Amplitude von 2,54 mm. Ab einer Frequenz von 18 Hz wird die maximale Beschleunigung linear bis auf  $8 \cdot g$  erhöht, bis eine Frequenz von 50 Hz erreicht ist. Bis zu der Endfrequenz von 200 Hz wird die Beschleunigung konstant gehalten. Um die Vibrationsbeständigkeit der Kontaktierung zu bestimmen, müssen die Randbedingungen des in Abbildung 2-5 visualisierten Zellverbunds beachtet werden. Für die Zellhalterung aus Kunststoff wurde basierend auf DIN 16742 eine fertigungsbedingte maximale z-Toleranz von  $\pm 1,25$  mm für jede Hälfte berechnet. Die Fertigungstoleranz der Batteriezelle ist mit  $\pm 0,15$  mm angegeben (LUXTRIM GMBH 2018). Innerhalb der Zellhalterung besteht damit für die Zelle ein maximales Spiel von  $\pm 2,65$  mm. Diese Randbedingung muss in den Vibrationszyklus der *UN38.3* integriert werden. Die maximale Amplitude wurde daher bei niedrigen Frequenzen auf 1,35 mm begrenzt. Daraus resultiert bei 7 Hz eine reduzierte maximale Beschleunigung von  $0,52 \cdot g$ . Ab einer Frequenz von 18 Hz entspricht der angepasste Vibrationszyklus dem vorgegebenen Zyklus der *UN38.3*. Die Anforderungen gelten als erfüllt, wenn sich das Ableiterblech nicht vom Zellgehäuse löst. Die Untersuchungen wurden jeweils mit der höchsten Anzahl an Schweißpunkten begonnen und jeweils für drei verschiedene Zellen mit identischen Parametern durchgeführt. Die Anzahl an Schweißpunkten wurde solange reduziert, bis eine der drei Zellen die Anforderungen nicht erfüllte.

Um zusätzlich eine mögliche Beeinträchtigung der Verbindung als Folge der Vibrationsprüfung zu ermitteln, wurde jeweils vor und nach der Untersuchung der elektrische Widerstand gemessen. Eine Erhöhung des elektrischen Widerstands kann auf durch die Vibration abgelöste Schweißpunkte zurückgeführt werden. Die verwendete Probengeometrie von Zellgehäuse und Ableiter lässt eine Messung am Prüfstand aus Abschnitt 4.5.1 nicht zu, weshalb eine Vier-Punkt-Messung mittels Krokodilklemmen durchgeführt wurde. Durch Anschläge wurde eine reproduzierbare Platzierung der Klemmen sichergestellt. Gleichzeitig wurde das Ableiterblech um die maximale Amplitude von 1,35 mm angehoben, damit abgelöste Schweißpunkte nicht zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen.

In Abbildung 5-16 sind die Ergebnisse der Differenz des elektrischen Widerstands vor und nach der Vibrationsprüfung für alle erfolgreich getesteten Parameter gezeigt. Für alle Parametersätze der Anzahl der Schweißpunkte, die nicht im Diagramm enthalten sind, wurde der Test nicht bestanden. Es ist zu erkennen, dass die Differenz des Widerstands bei einer kleineren Anzahl an Schweißpunkten größer ist. Auch bei der maximalen Anzahl an Schweißpunkten war eine geringe Erhöhung des Widerstands festzustellen, was auf eine Beeinträchtigung der Kontaktierung hindeutet. Die WPS-Referenzproben haben die Vibrationstests bestanden und weisen bei der Widerstandsmessung nur eine geringere Differenz auf. Analog zu den Ergebnissen der mechanischen Zugfestigkeit ist die große Anbindungsfläche der WPS-Proben auch in Bezug auf die Vibrationsbeständigkeit vorteilhaft. Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann die notwendige Anzahl an Schweißpunkten zur Erfüllung der Anforderungen festgelegt werden:

- $d_p = 3 \text{ mm}$ :  $9 < N_p \leq 12$
- $d_p = 5 \text{ mm}$ :  $12 < N_p \leq 15$
- $d_p = 10 \text{ mm}$ :  $15 < N_p \leq 18$

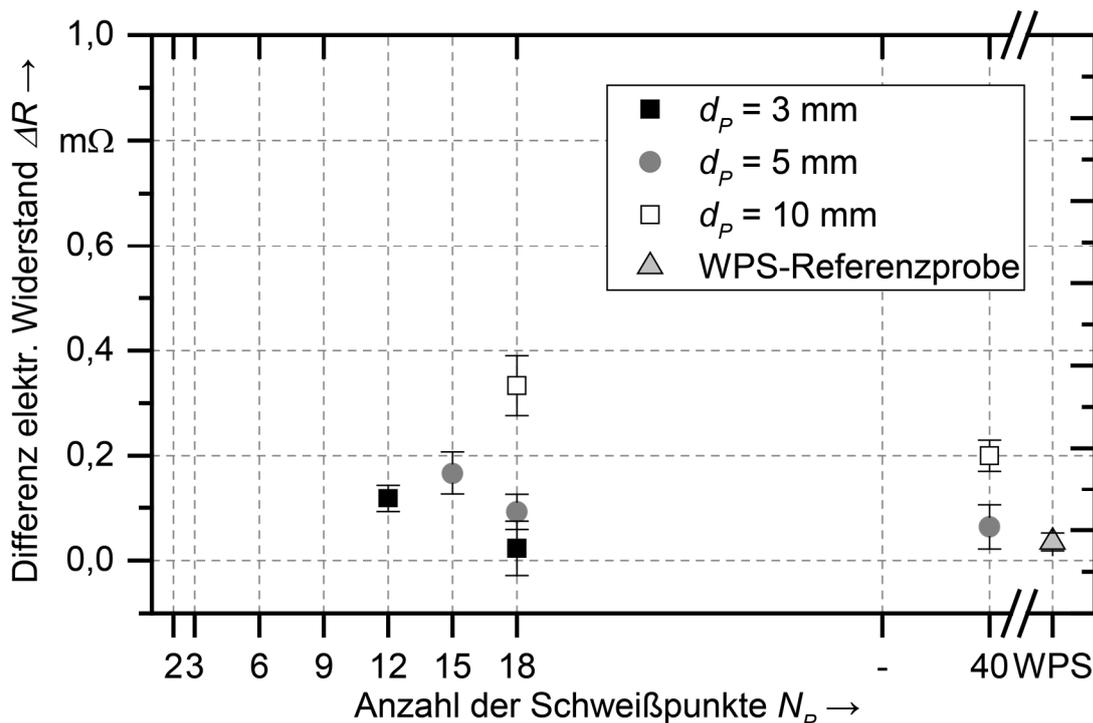


Abbildung 5-16: Differenz des elektrischen Widerstands der Proben vor und nach der erfolgreichen Prüfung nach UN38.3 T3: Vibration; Darstellung in Abhängigkeit von der Anzahl der Schweißpunkte  $N_p$  für die drei Schweißpunktdurchmesser  $d_p$ ; die Fehlerbalken stehen für die Standardabweichung vom Mittelwert der Messungen; mittlerer Widerstand vor der Vibrationsprüfung für alle Proben:  $1,07 \pm 0,11 \text{ m}\Omega$

Die notwendige Anzahl an Schweißpunkten ist mit zunehmendem Kreisdurchmesser größer. Dies kann über eine verkürzte Strecke zwischen der starren Befestigung des Ableiters in der Spannvorrichtung und den Schweißpunkten begründet werden (vgl. Abbildung 5-17). Bei größeren Durchmessern wird das Ableiterblech stärker gedehnt. Entsprechend dem Hookeschen Gesetz werden die Schweißpunkte daher umso stärker auf Zug beansprucht, je näher sie sich an der Aufhängung befinden. Ein vollständiges Ablösen der Kontaktierung trat während des Versuchs bei kleinen Amplituden von  $< 0,4$  mm auf. Daraus wird geschlossen, dass zunächst einzelne Schweißpunkte aufgrund einer höheren Dehnung versagen, was im Testzyklus niedrigeren Frequenzen entspricht. Eine vollständige Ablösung des gesamten Bleches tritt dann in Folge unzulässiger Vibrationsbeanspruchungen bei hohen Frequenzen auf, da die restlichen angebonden Schweißpunkte eine zu geringe Vibrationsbeständigkeit aufweisen.

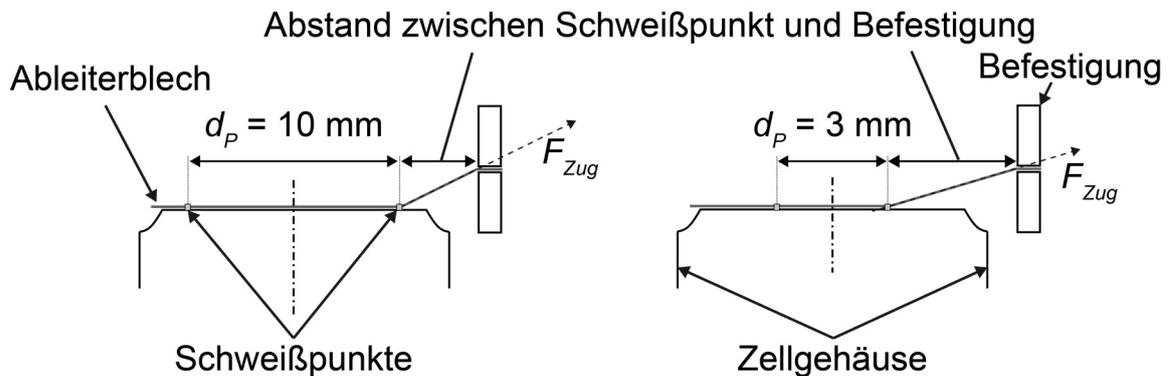


Abbildung 5-17: Schematische Darstellung der Zugbelastung  $F_{Zug}$  des Ableiterblechs bei der Vibrationsanalyse für die Schweißpunktdurchmesser 10 mm (links) und 3 mm (rechts)

#### 5.4.6 Kombinierte Betrachtung

Die Auslegung der Anbindungsfläche erfolgte über eine kombinierte Betrachtung der drei untersuchten Kriterien *elektrische Leitfähigkeit*, *mechanische Zugfestigkeit* und *Vibrationsbeständigkeit*. In Tabelle 5-6 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Bei einem Kreisdurchmesser von 3 mm konnten die Anforderungen nicht erfüllt werden, da der elektrische Widerstand unabhängig von der Schweißpunktanzahl über dem Wert der WPS-Referenzproben liegt. Bei kleinen Kreisdurchmessern ist zunächst der elektrische Widerstand das für die Auslegung relevante Kriterium. Aus diesem Grund werden für  $d_p = 5$  mm 20 Schweißpunkte benötigt. Mit zunehmendem Durchmesser können die Anforderungen hinsichtlich des elektrischen Widerstands schon bei klei-

nen Werten von  $N_P$  erfüllt werden, sodass die Vibrationsbeständigkeit hier die entscheidende Eigenschaft darstellt. Für  $d_P = 10$  mm wird somit eine Anzahl von 18 Schweißpunkten benötigt. In Tabelle 5-6 ist, neben den Ergebnissen für die notwendige Anzahl an Schweißpunkten, auch die entsprechende Größe der Anbindungsfläche der gesamten Schweißnaht angegeben. Die aus den Schliffbildern (vgl. Abbildung 5-9 1)) bestimmte Anbindungsfläche eines Schweißpunktes beträgt  $0,0315$  mm<sup>2</sup>.

*Tabelle 5-6: Notwendige Anzahl an Schweißpunkten  $N_P$  zur Erfüllung der Anforderungen für die Kreisdurchmesser  $d_P$*

maßgebende Eigenschaft	notwendige Anzahl an Schweißpunkten		
	$d_P = 3$ mm	$d_P = 5$ mm	$d_P = 10$ mm
elektrischer Widerstand	-	20	8
mechanische Zugfestigkeit	6	6	6
Vibrationsbeständigkeit	12	15	18
Schweißpunkte		20	18
Kombination Anbindungsfläche der Schweißnaht	-	$0,63$ mm <sup>2</sup>	$0,57$ mm <sup>2</sup>

## 5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Auslegung des Prozesses zur elektrischen Kontaktierung von zylindrischen Zellen mittels Laserstrahlung beschrieben. Zunächst wurden gemäß dem Stand der Technik vier Strategien zum gepulsten Laserstrahlschweißen vorgestellt und geeignete Parameter ermittelt, um diese Strategien auf die vorliegende Problemstellung anzuwenden. Die resultierenden Ergebnisse wurden hinsichtlich des elektrischen Widerstands und der mechanischen Zugfestigkeit verglichen. Alle Ergebnisse wiesen vergleichbare elektrische Widerstände auf. Der Spike-Puls konnte aufgrund seiner kleinen Pulsenergie und kleinen Schwankungen der Ergebnisse als sehr gut geeignet für die Kontaktierung identifiziert werden. In den nachfolgenden Untersuchungen wurden mittels statistischer Versuchsplanung drei potenziell geeignete Parametersätze ermittelt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Peak-Energie des Pulses maßgeblich die Einschweißtiefe beeinflusst. Die Anbindungsfläche hingegen korreliert mit der Vorwärmenergie des Pulses. Nur einer der drei Parametersätze konnte erfolgreich auf Reproduzierbarkeit überprüft werden und wird daher im Rahmen dieser Arbeit als Schweißprozess zur Kontaktierung der Zellen festgelegt.

Nachfolgend wurde die erforderliche Anzahl an Schweißpunkten betrachtet, welche notwendig ist, um die Anforderungen hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit, der mechanischen Zugfestigkeit und der Vibrationsbeständigkeit zu erfüllen. Für die Definition der Anforderungen wurden für die Leitfähigkeit der WPS-Referenzprozess und für die Festigkeit sowie die Vibrationsbeständigkeit die Norm *UN38.3* herangezogen. Anhand der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bei kleinen Kreisdurchmessern der Punktfolge die elektrische Leitfähigkeit das entscheidende Kriterium für die Auslegung ist. Mit größeren Durchmessern ist die Vibrationsbeständigkeit von entscheidender Bedeutung. Es wurden drei verschiedene Kreisdurchmesser analysiert. Für  $d_p = 3$  mm konnten die Anforderungen aufgrund einer unzureichenden Leitfähigkeit nicht erfüllt werden. Bei den größeren Durchmessern von 5 mm und 10 mm sind 20 bzw. 18 Schweißpunkte notwendig.

Die Ergebnisse der Auslegung des Schweißprozesses werden in Kapitel 8 aufgegriffen, um die Kontaktierung eines Zellverbunds zu betrachten. Hierbei konnte ein Durchmesser von 10 mm aufgrund der Spannsituation nicht realisiert werden. Im nachfolgenden Kapitel wird daher der Einfluss der prozessbedingten Temperaturänderung auf die Zelleigenschaften für einen Kreisdurchmesser von 5 mm betrachtet.



## 6 Einfluss der Kontaktierung auf die Zelleigenschaften

### 6.1 Allgemeines

In dem vorangegangenen Kapitel 5 wurde der gepulste Schweißprozess betrachtet, um geeignete Prozessparameter für die reproduzierbare Kontaktierung der Batteriezellen zu ermitteln. Weiterhin wurde untersucht, wie viel an Anbindungsfläche benötigt wird, um die gegebenen Anforderungen bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit, der mechanischen Zugfestigkeit und der Vibrationsbeständigkeit zu erfüllen. Die Schweißpunkte wurden auf einer Kreislinie angeordnet, wobei drei Kreisdurchmesser untersucht wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass für den kleinsten Durchmesser von 3 mm die Anforderungen nicht erfüllt werden können. Die für den Prozess notwendige Spannvorrichtung der Zellen schließt einen Durchmesser von 10 mm aus, weshalb für die Evaluierung der thermischen Belastung ausschließlich ein Durchmesser von 5 mm betrachtet wird.

In Kapitel 5 wurde für die Auslegung des Schweißprozesses eine hohe Reproduzierbarkeit des Prozesses vorausgesetzt. Eine Schädigung der Zelle wird jedoch nicht nur durch ein Durchschweißen hervorgerufen, sondern kann auch bei zu hohen Temperaturbelastungen im Inneren der Zelle auftreten (vgl. Abschnitt 2.2.5). Eine große Anbindungsfläche führt zu einem erhöhten Wärmeeintrag in die Zelle. Daher muss sichergestellt werden, dass die hervorgerufenen Temperaturen die Funktionsfähigkeit der Zelle nicht beeinflussen.

Aus diesem Grund wird innerhalb dieses Kapitels untersucht, welche Temperaturen in der Zelle in Abhängigkeit von der Anzahl der applizierten Pulse hervorgerufen werden. Insbesondere werden hierbei Strategien betrachtet, die zu einer Reduzierung der auftretenden Maximaltemperatur führen. Die gleichzeitige Kontaktierung mehrerer Zellen mittels Remote-Bearbeitung liefert hierbei neue Möglichkeiten der Prozessführung, die zu einer reduzierten Temperaturbelastung führen.

Abschließend wird innerhalb dieses Kapitels überprüft, ob eine Überschreitung der kritischen Temperatur innerhalb der Zelle zu einer Beeinträchtigung der Kapazität führt. Auf diese Weise kann abgeschätzt werden, inwieweit die laserbasierte Kontaktierung auch ohne ein Durchschweißen zu einer Schädigung der Zelle führen kann.

## 6.2 Evaluierung der thermischen Belastung

Um den Schweißprozess von Batteriezellen möglichst realitätsnah abbilden zu können, wurden in diesem Abschnitt leere Zellhüllen (Typ 26650) für die Schweißversuche verwendet. Die Spannsituation und die Temperaturmessungen wurden gemäß Abschnitt 4.3.2 durchgeführt. Die Ergebnisse der Temperaturmessung sind mit der realen Situation vergleichbar, da das Thermoelement an der Stelle platziert wurde, an welcher der Zellwickel mit dem Gehäuse verbunden ist (vgl. Abbildung 2-6).

Das Ableiterblech wurde mittels Schweißpunkten an die Zellhülle angebunden. Dabei wurden die Punkte kreisförmig mit einem Durchmesser von 5 mm angeordnet. Mittels Thermoelement konnte die Temperaturveränderung mittig an der Innenseite des Zellgehäuses am negativen Zellpol gemessen werden. Um die Temperaturveränderung mit der Anzahl der geschweißten Punkte zu korrelieren, wurde eine unterschiedliche Anzahl an Schweißpunkten mit einem möglichst gleichmäßigen Abstand zueinander auf einer Kreislinie verteilt appliziert. Für jede Anzahl von Schweißpunkten wurden drei Proben angefertigt.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 6-1 dargestellt. Es ist ein linearer Anstieg der Temperaturveränderung zu erkennen. In der Abbildung ist zusätzlich das Ergebnis der linearen Regression visualisiert. Bei einer Schweißpunkteanzahl von 40 wurde ein Temperaturanstieg von 42,4 K gemessen. Dabei kann innerhalb der Schwankungen nicht sichergestellt werden, dass die kritische Temperatur  $T_{krit}$  von 70 °C nicht überschritten wird.

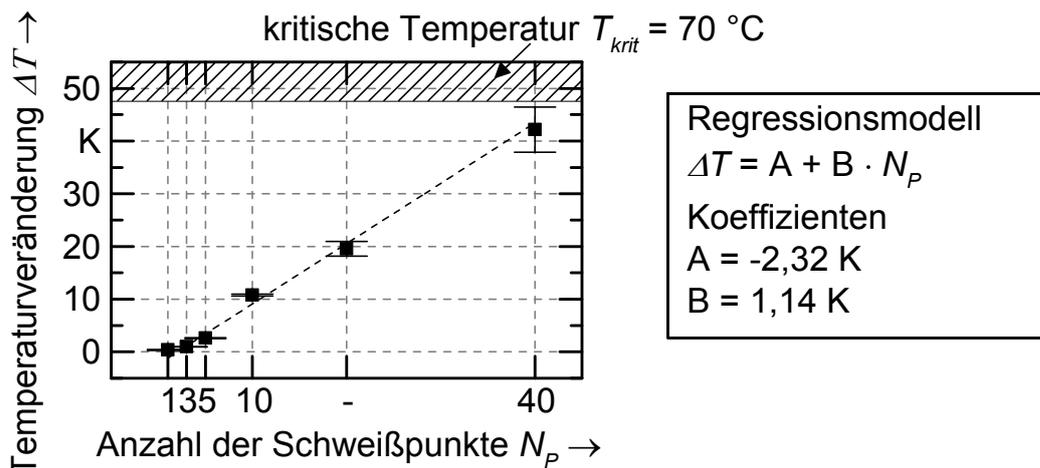


Abbildung 6-1: Temperaturveränderung in Abhängigkeit von der Anzahl der Schweißpunkte mit einem linearen Regressionsmodell; Prozessparameter: Nummer 1 gemäß Tabelle 5-3; Schweißfrequenz: 50 Hz; Raumtemperatur: 22 °C; die Fehlerbalken stehen für die Standardabweichung vom Mittelwert der Messungen

Mittels der Scanner-Spiegel kann die Laserstrahlung nahezu ohne Zeitverluste abgelenkt werden, sodass der Zeitbedarf für die Positionierung der Schweißpunkte im Bearbeitungsbereich in Relation zu der Schweißdauer eines Punktes vernachlässigbar gering ist. Während bei einem cw-Schweißprozess eine Zelle nach der anderen kontaktiert werden muss, ergeben sich durch das gepulste Schweißen neue Möglichkeiten der Prozessführung. Da die Schweißprozesse der einzelnen Punkte unabhängig voneinander sind, müssen nicht alle Zellen sequenziell verschweißt werden. Beispielsweise ist es möglich, auf jeder Zelle zunächst 20 Schweißpunkte zu applizieren. Nachdem innerhalb dieser Sequenz alle Zellen mit jeweils 20 Punkten verschweißt wurden, konnten in einer zweiten Sequenz erneut 20 Punkte pro Zelle gesetzt werden. Hierbei ergaben sich Abkühlzeiten, die mit der Anzahl der zu kontaktierenden Zellen korrelieren. Für einen Verbund aus zwölf Zellen und eine Schweißfrequenz von 50 Hz folgte eine Prozesszeit von 0,4 s für 20 Punkte. Dies führte zu einer Abkühlzeit von 4,4 s zwischen den beiden Schweißsequenzen für jede Zelle.

Die Auswirkung dieser sequenziellen Aufteilung auf die Temperaturveränderung wurde anhand von 40 Schweißpunkten für drei verschiedene Abläufe am Beispiel des Verbunds aus zwölf Zellen aus Abbildung 2-5 untersucht. Hierzu wurden 1·40 Punkte, 2·20 Punkte und 4·10 Punkte verschweißt. Die Ergebnisse können der Abbildung 6-2 entnommen werden. Es konnte eine geringere Maximaltemperatur festgestellt werden, wenn die Schweißpunkte in mehrere Sequenzen aufgeteilt wurden. Für 2·20 Punkte konnte im Vergleich zu 1·40 Punkte eine Reduzierung der maximalen Temperaturveränderung um 35 % auf  $\Delta T = 28,4$  K erzielt werden. Für vier Sequenzen von je 10 Punkten konnte eine weitere Reduzierung auf  $\Delta T = 19,5$  K erreicht werden. Aus den Ergebnissen folgt, dass eine Aufteilung der zeitlichen Abfolge der Schweißpunkte auf die verschiedenen Zellen des Zellverbunds zu einer nützlichen Reduzierung der Temperaturbelastung führt. Dies stellt somit eine geeignete Methode dar, um temperatursensible Bauteile zu fügen und eine möglichst gleichmäßige Absorption der Laserstrahlung sicherzustellen.

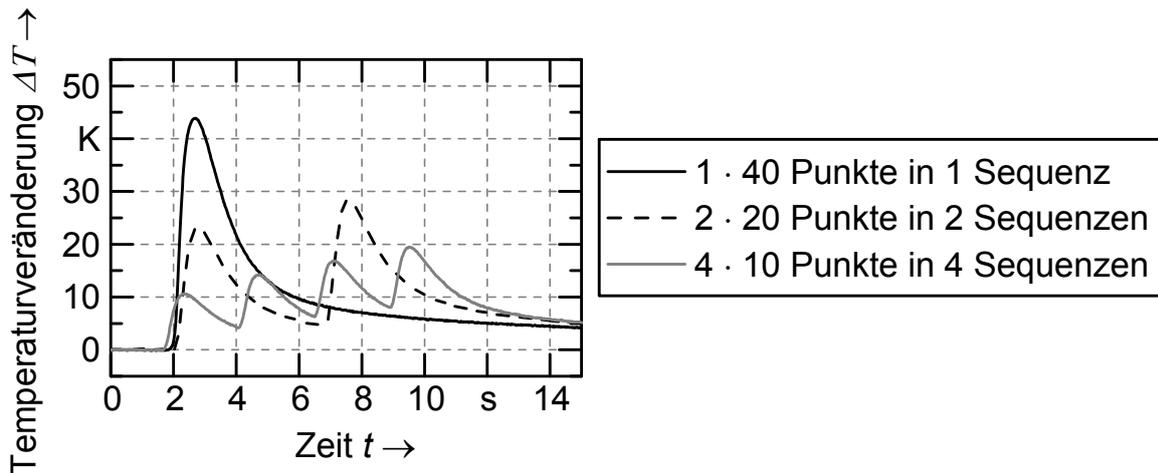


Abbildung 6-2: Temperaturveränderung in Abhängigkeit von der Prozesszeit für drei Sequenzen; Prozessparameter: Nummer 1 gemäß Tabelle 5-3; Schweißfrequenz: 50 Hz; Raumtemperatur: 22 °C

### 6.3 Einfluss der Prozesswärme auf die Zellkapazität

In Abschnitt 2.2.5 wurde erläutert, inwieweit durch einen externen Wärmeeintrag die Zellkomponenten während des Schweißprozesses geschädigt werden können. Das Ziel der in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchungen ist, diesen Effekt auch für die laserbasierte Kontaktierung von zylindrischen Zellen nachzuweisen. Es wurden Batteriezellen mit zwei unterschiedlichen Prozessstrategien kontaktiert. Diese wurden so gewählt, dass die kritische Temperatur innerhalb der Zelle überschritten wird. Anschließend wurde die Kapazität der Zellen über 60 Lade- und Entladezyklen hinweg gemessen. Das Ziel war es eine Kapazitätsdifferenz zwischen den kontaktierten und nicht kontaktierten Referenzzellen nachzuweisen.

Die in Abschnitt 5.4 vorgestellten Ergebnisse dienen als Ausgangssituation für die nachfolgenden Betrachtungen. Durch eine geeignete Wahl des Kreisdurchmessers und der Anzahl der Schweißpunkte konnte eine bestimmte Maximaltemperatur während des Schweißprozesses hervorgerufen werden. Um eine ausreichend hohe Temperatur zu erreichen, wurden Schweißpunkte in unterschiedlichen Kreisdurchmessern auf der Zelle platziert. Dadurch konnte die Anzahl der Schweißpunkte erhöht werden. Die Temperaturmessungen erfolgten dabei wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Die gewählten Parametersätze  $T_1$  und  $T_2$  sind in Abbildung 6-3 oben gezeigt. Der Parametersatz  $T_1$  zeichnete sich durch 18 Schweißpunkte, die kreisförmig mit einem Durchmesser von 3 mm angeordnet waren, und durch einen einzelnen Schweißpunkt in der Mitte des Zellgehäuses aus. Demgegenüber wurden beim Parametersatz  $T_2$  zwei Kreise mit einem Durchmesser von 5 mm und 40 Schweißpunkten sowie einem

Durchmesser von 3 mm und 18 Schweißpunkten appliziert. Bei diesem Parametersatz wurde zudem ein einzelner Schweißpunkt in der Mitte des Zellbodens appliziert, um höhere Temperaturen im Bereich der Anbindung des Zellwickels zu erreichen. Die Schweißpunkte wurden alle unter Anwendung des Prozessparameters Nummer 1 aus Tabelle 5-3 hergestellt. Die verschiedenen Kreisdurchmesser wurden jeweils in einer Reihenfolge beginnend mit dem größten Durchmesser geschweißt, sodass der Schweißpunkt in der Mitte den Abschluss des Prozesses bildete.

Die innerhalb der Vorversuche der an leeren Zellhüllen gemessenen zeitlichen Temperaturverläufe sind in Abbildung 6-3 veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass der einzelne Schweißpunkt zu einer signifikanten Erhöhung der maximalen Temperaturdifferenz beiträgt, da das Thermoelement für die Messungen in der Mitte des Zellbodens (leeres Zellgehäuse) platziert war. Die gemessenen maximalen Temperaturdifferenzen waren  $\Delta T_{max} = 111$  K für Parametersatz  $T_1$  und  $\Delta T_{max} = 190$  K für Parametersatz  $T_2$ . Dementsprechend wurde bei der Anwendung beider Parametersätze die maximale zulässige Temperaturdifferenz von 48 K überschritten.

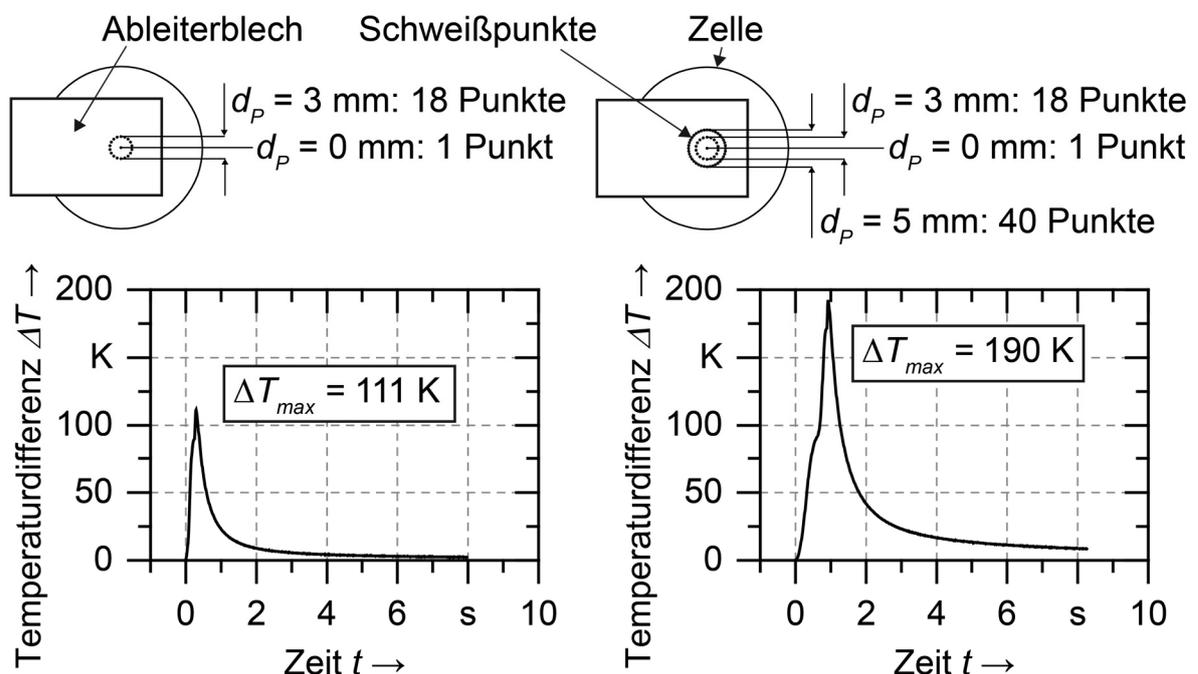
a) Parametersatz  $T_1$ b) Parametersatz  $T_2$ 

Abbildung 6-3: Temperaturveränderung in Abhängigkeit von der Prozesszeit für die Parametersätze  $T_1$  und  $T_2$ ; die jeweilige Geometrie der Punktfolge und die Anzahl der Schweißpunkte sind schematisch visualisiert; Prozessparameter: Nummer 1 gemäß Tabelle 5-3; Raumtemperatur:  $22$  °C

Die beiden Parametersätze  $T_1$  und  $T_2$  wurden anschließend angewendet, um funktionsfähige Zellen zu kontaktieren. Hierbei wurde die Spannvorrichtung der Temperaturmessung ohne den Zylinder zur Positionierung des leeren Gehäuses verwendet. Um die Temperaturentwicklung der Batteriezelle während und nach dem Schweißvorgang zu überwachen, wurde eine Thermokamera eingesetzt. Für beide Parametersätze wurden jeweils drei Zellen analog zu den Versuchen in Kapitel 5 an 0,2 mm dicke vernickelte Stahlbleche geschweißt. Nachdem sichergestellt wurde, dass kein unkontrollierter Anstieg der Zelltemperatur nach der Kontaktierung einsetzte (sog. thermisches Durchgehen), wurden die Zellen über sieben Tage hinweg in einer Kammer mit installierter Absaugung gelagert. Dadurch wurde sichergestellt, dass eventuell austretende Gase nicht zu einer Gefährdung führten. In Abbildung 6-4 sind Aufnahmen der Batteriezellen nach dieser Ruhezeit gezeigt. Es konnten keine Substanzen festgestellt werden, die aus der Zelle ausgetreten waren. Somit lag offensichtlich keine durch den Schweißprozess hervorgerufene Undichtigkeit vor.

a) Parametersatz  $T_1$



b) Parametersatz  $T_2$



Abbildung 6-4: Aufnahme von jeweils drei kontaktierten Zellen mit den Parametersätzen  $T_1$  a) und  $T_2$  b) gemäß Abbildung 6-3; Schweißparameter: Nummer 1 gemäß Tabelle 5-3

Für die Analyse der Kapazität wurden alle sechs Zellen entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 4.5.4 getestet. Alle Zellen wurden insgesamt 19 Lade- und Entladezyklen unterzogen. Als Referenz wurden drei unverschweißte Zellen mit derselben Prozedur getestet. In Abbildung 6-5 a) sind die CC-CV-Ladekapazitäten über den Verlauf der 19 Zyklen für den Parametersatz  $T_1$  dargestellt. Die Kapazitäten

aller Zellen waren zwischen 2,90 Ah und 2,95 Ah. Es war keine Abweichung gegenüber den Referenzzellen festzustellen, da die verschweißten Zellen eine vergleichbare Kapazität aufwiesen.

Innerhalb der ersten Zyklen konnte für die Zellen des Parametersatzes  $T_2$  keine Abweichung der Kapazität in Bezug auf die Referenzzellen festgestellt werden (vgl. Abbildung 6-5 b)). Nach 15 Zyklen wiesen die Zellen  $T_2$  #1 und  $T_2$  #3 eine Reduzierung der Kapazität auf. Nach 19 Zyklen konnte für die Zelle  $T_2$  #1 eine um 2,5 % reduzierte Kapazität im Vergleich zu den Referenzzellen festgestellt werden. Die Zellen  $T_2$  #2 und  $T_2$  #3 wiesen nach 19 Zyklen ebenfalls eine geringere Kapazität als die Referenzzellen auf. Aufgrund der kleinen Streuung der Zellkapazitäten können diese Abweichungen als signifikant angenommen werden.

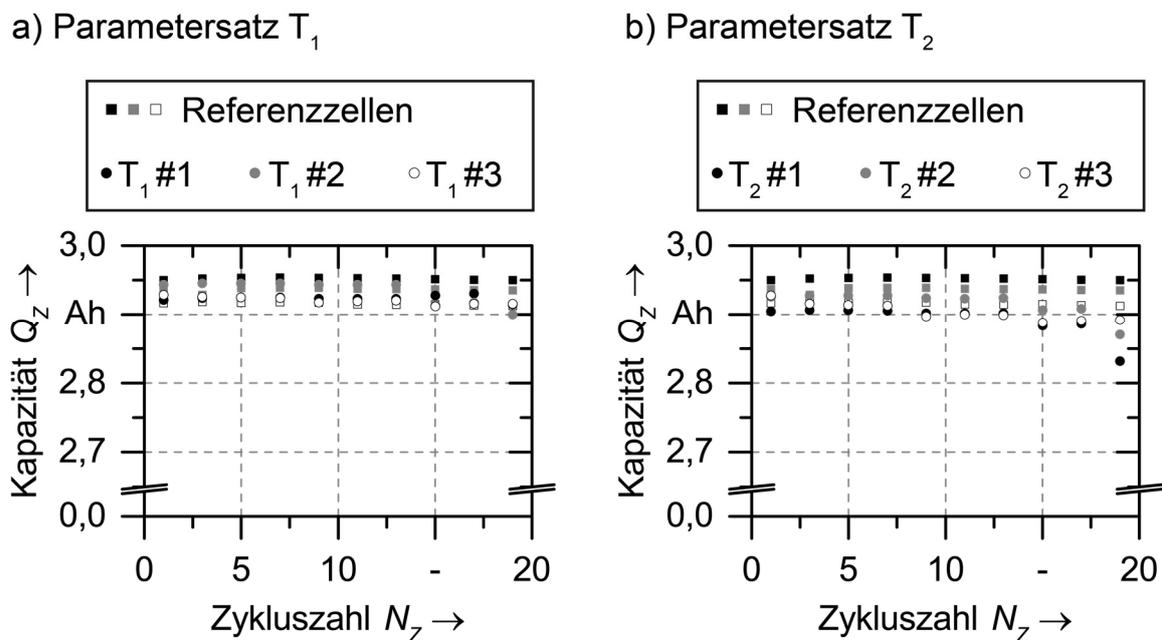


Abbildung 6-5: Verlauf der gemessenen CC-CV-Ladepkapazität der Zellen für die Parametersätze  $T_1$  und  $T_2$  gemäß Abschnitt 4.5.4; Ladestrom:  $I = 3 \text{ A}$ ; die Kapazitäten von drei nicht verschweißten Zellen sind als Referenz dargestellt; Umgebungstemperatur:  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass kurzzeitige Temperaturerhöhungen (ca. 0,5 s) innerhalb der Zellen über die kritische Zelltemperatur von 70 °C bis zu maximal 123 °C zu keiner Beeinträchtigung der Zellkapazität führen. Demgegenüber wurde für eine 1,6 s lange Temperaturerhöhung über die kritische Temperatur bis zu einem Maximalwert von 212 °C eine Reduzierung der Kapazität festgestellt. Es ist davon auszugehen, dass unter Anwendung des Parametersatzes  $T_2$  die kritische Temperatur in einem größeren Bereich innerhalb der Zelle überschritten wird. Hierbei können anodenseitig Zersetzungsreaktionen der elektrochemischen Grenzschicht (sog. Solid-Electrolyte Interphase) auftreten, welche die Ladekapazität verringern (ROTH & DOUGHTY 2004). Weiterhin kann eine lokale Verschließung der Poren des Separators zu einer Beeinträchtigung des Ladungsaustausches in der Zelle und somit ebenfalls zu einem Kapazitätsverlust führen. Ein Einfluss auf die Zellsicherheit konnte nicht festgestellt werden.

### 6.4 Zusammenfassung

Innerhalb dieses Kapitels wurde die Untersuchung des Einflusses der prozessbedingten Temperaturänderung auf die Zelleigenschaften beschrieben. Hierzu wurde zunächst die Temperaturveränderung während des Schweißprozesses innerhalb der Zelle gemessen. In Abhängigkeit von der Anzahl der applizierten Schweißpunkte konnte ein linearer Anstieg der Temperatur festgestellt werden. Dieser liegt bei ca. 1 K pro Schweißpunkt, sodass innerhalb der gemessenen Schwankungen ab etwa 40 Schweißpunkten ein Überschreiten der kritischen Temperatur von 70 °C nicht mehr ausgeschlossen werden kann.

Um einer zu hohen Temperatur entgegenzuwirken, wurde eine spezielle Prozessführung vorgestellt. Das Schweißen mittels gepulster Laserstrahlung und einer Scanneroptik ermöglicht es, während des Schweißvorgangs zwischen den verschiedenen Zellen zu wechseln, sodass beliebige Sequenzen von Schweißpunkten ohne nennenswerte Einbußen hinsichtlich der Prozesszeit erzeugt werden können. Es ist möglich, anstatt 40 Schweißpunkte auf allen Zellen jeweils auf einmal sequenziell zu applizieren, zunächst 20 Punkte zu verschweißen. Sind alle Zellen mit dieser Anzahl an Punkten verschweißt, können erneut 20 Schweißpunkte je Zelle erzeugt werden. Dies führt zwischen diesen beiden Sequenzen zu einer Abkühlzeit für die Batteriezellen. Durch die durchgeführten Temperaturmessungen wurde nachgewiesen, dass auf diese Weise die Maximaltemperatur reduziert werden kann. Während bei einer Sequenz von jeweils 40 Schweißpunkten eine maximale Temperaturveränderung von 43,9 °C

auftrat, konnte bei zwei Sequenzen mit jeweils 20 Punkten eine Reduzierung der maximalen Temperaturveränderung auf 28,4 °C festgestellt werden. Aufgrund der Scanneroptik waren die Positionierungszeiten vernachlässigbar gering, sodass keine Beeinträchtigung der Prozesszeit vorlag.

Im weiteren Verlauf des Kapitels wurde untersucht, inwieweit eine Temperatur oberhalb der kritischen Zelltemperatur zu einer Reduzierung der Zellkapazität führt. Hierfür wurden zwei Parametersätze vorgestellt, die sich in der Anzahl der Schweißpunkte und des Kreisdurchmessers, auf denen diese platziert wurden, unterschieden. Das Verschweißen von Batteriezellen mit diesen Parametersätzen führte zu Maximaltemperaturen innerhalb der Zelle von 133 °C sowie 212 °C. Jeweils drei verschweißte Zellen wurden innerhalb von 20 Lade- und Entladezyklen getestet und mit unverschweißten Referenzzellen verglichen. Während für die Zellen mit  $T_{max} = 133$  °C keine Veränderungen festgestellt werden konnten, zeigten zwei der drei Zellen mit  $T_{max} = 212$  °C eine signifikant reduzierte Kapazität in Bezug auf die Referenzzellen. Es ist davon auszugehen, dass sowohl die höhere Temperatur als auch die längere Dauer der Temperaturbelastung zu einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit führten.

Zur Herstellung eines Zellverbunds werden die Batteriezellen mit dem in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Schweißverfahren mit einem Zellverbinder angebunden. Im nachfolgenden Kapitel wird eine Methode zur geometrischen Auslegung dieses Bauteils beschrieben.



## 7 Methode zur simulationsgestützten Auslegung des Zellverbinders

### 7.1 Allgemeines

Die Anforderungen an die Auslegung des Zellverbinders wurden in Abschnitt 2.2.4 ausführlich beschrieben. Ein wichtiges Ziel ist die Nivellierung der elektrischen Widerstände zwischen den Zellenkontakten und den Anschlüssen, um einen gleichmäßigen Stromfluss in den Zellen und infolgedessen einen stets gleichmäßigen Ladezustand zu erreichen. Ein weiteres Ziel ist es, den mittleren Widerstand des Zellverbinders so gering wie möglich zu halten, damit möglichst wenig Energie über das Stromwärmegesetz in Wärme umgewandelt wird. Das dritte Ziel ist die Minimierung der Masse des Bauteils aufgrund der Forderung nach Leichtbau und geringen Materialkosten.

Ein beispielhafter Aufbau eines Zellverbunds inklusive Zellverbinder ist in Abbildung 2-5 in Abschnitt 2.2.4 veranschaulicht. Der Zellverbinder besteht aus einem hochleitfähigen Werkstoff, wie zum Beispiel Kupfer, mit gleichmäßiger Dicke. Daraus kann gefolgert werden, dass der elektrische Widerstand sowie die Masse des Verbinders nur noch von der geometrischen Ausprägung des Bauteils abhängig sind. Im folgenden Verlauf des Kapitels wird daher eine Methode zur automatisierten Topologieoptimierung eines Zellverbinders für parallel verschaltete Batteriezellen vorgestellt.

Zu Beginn werden ein vereinfachtes Modell von drei verschiedenen Verbindungsstellen und einer Anschlussstelle, welches für die Entwicklung und Verifizierung der Methode genutzt wurde, sowie der Lösungsansatz beschrieben. Anschließend werden die Grundlagen der elektrischen Modellbildung und die Parameter des für die Gestaltung verwendeten Genetischen Algorithmus inklusive Zielfunktion dargelegt. Die Ergebnisse der Optimierung werden, aufgeteilt in die zwei Stufen *grundlegende Optimierung* und *Feinoptimierung*, beschrieben. Das Ergebnis der Optimierung ist eine fertigungsgerechte Geometrie des Zellverbinders. Den Abschluss dieses Kapitels stellt die Verifizierung der Methode dar.

## 7.2 Optimierungsaufgabe und Lösungsansatz

### 7.2.1 Beschreibung der Optimierungsmethode

Die in diesem Kapitel behandelte Optimierungsaufgabe ist dadurch erforderlich, dass der elektrische Strom aus drei Verbindungsstellen zu einer Anschlussstelle fließt. Die Verbindungsstellen repräsentieren im Zellverbund die Fügeverbindungen zwischen Ableiterblech und Zellverbinder und definieren daher die Stromquellen des Bauteils. Über die Anschlussstelle kann der Strom an einen weiteren Zellverbund weitergeleitet werden und stellt damit im Modell die Erdung dar. Der gesamte Designraum ist im verwendeten Modell in kleine Teilbereiche, so genannte Elemente, unterteilt. Diese Elemente weisen eine hexagonale Geometrie auf (vgl. Abbildung 7-1). Die Geometrie wird binär dargestellt (vgl. Abschnitt 3.4). Die Größe des binären Variablenvektors entspricht der Anzahl dieser Elemente. Der Wert 1 (an) weist dem entsprechenden Bereich einen leitfähigen Werkstoff zu, während bei dem Wert 0 (aus) ein nicht leitender Werkstoff zugeordnet wird. Gegenüber Quadraten hat die hexagonale Geometrie den Vorteil, dass sich zwischen den Elementen immer ein Linienkontakt ergibt. Dadurch wird für beliebige zusammenhängende Bauformen eine übermäßige Verengung der elektrischen Feldlinien verhindert. Zur Realisierung der Verbindungsstellen und der Anschlussstelle wird eine Kreisform verwendet. Die Verbindungsstelle 3 weist einen größeren Abstand zur Erdung auf, was dort zu einem höheren Widerstand führt, wenn der Optimierungsbereich vollständig mit leitfähigem Werkstoff gefüllt ist. Die Elemente um die Verbindungsstellen und die Anschlussstelle sind, unabhängig von der Optimierung, immer mit leitfähigem Werkstoff belegt. Durch den Optimierungsalgorithmus werden den Elementen der Optimierungsfläche entweder leitfähige oder nicht leitfähige Eigenschaften zugeordnet.

Die Größe der hexagonalen Elemente hat einen entscheidenden Einfluss auf das Optimierungsergebnis. Eine kleine Seitenlänge erzeugt feiner aufgelöste Ergebnisgeometrien, hat jedoch eine überproportionale Steigerung der Freiheitsgrade innerhalb des Genetischen Algorithmus zur Folge. Eine Erhöhung der Freiheitsgrade bewirkt nicht nur, dass die Rechendauer vergrößert wird, sondern erschwert auch die Suche nach einer optimalen Lösung. Nach KOLBE & HELLWIG (2015, S. 44) liegt die minimal durch Stanzen herstellbare Stegbreite für ein Blechteil aus Kupfer mit einer Dicke von 1 mm bei etwa 1,5 mm bis 2,0 mm, sodass die Auswahl kleinerer Seitenlängen fertigungsbedingt nicht sinnvoll ist. Da innerhalb der Optimierung ein

zweistufiges Verfahren angewendet wird, bei dem zunächst eine effiziente Groboptimierung durchgeführt werden soll (vgl. Abschnitt 7.3), wurde die Seitenlänge der hexagonalen Elemente auf einen Wert von 2,5 mm festgelegt.

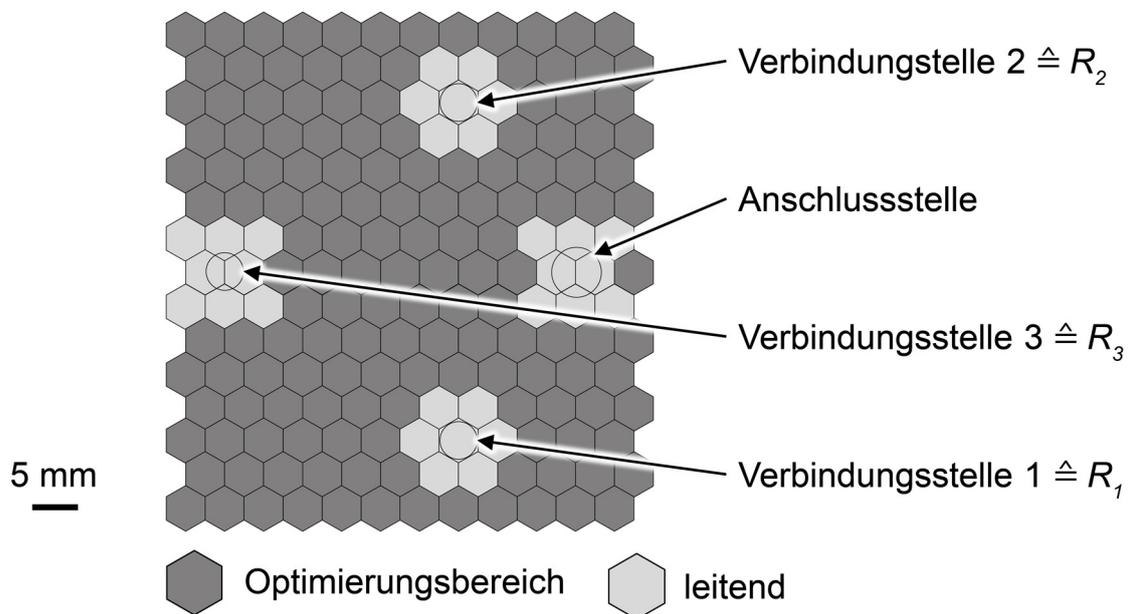


Abbildung 7-1: Vereinfachtes Modell für die Anwendung des Optimierungsalgorithmus; der Bauraum wird in hexagonale Elemente unterteilt; Kreise beschreiben die Verbindungsstellen und die Anschlussstelle

Die Zielgrößen der Optimierung sind die Widerstände zwischen den Verbindungsstellen und der Anschlussstelle sowie die Fläche des Zellverbinders. Eine Fitnessfunktion (vgl. Formel (7-6)) fasst die verschiedenen Zielwerte gewichtet zusammen, sodass ein einziger Fitnesswert ausreicht, um das multikriterielle Problem zu beschreiben. Die Fitnessfunktion ist als Minimierungsproblem formuliert. Ein minimaler Fitnesswert stellt demnach den optimalen Kompromiss aller Zielwerte dar. Mithilfe einer elektrischen FE-Simulation können der Stromfluss durch die Geometrie des Zellverbinders simuliert und die elektrischen Widerstände zur Berechnung der Fitnessfunktion ermittelt werden. Die Werte der Zielfunktion werden anschließend in den Genetischen Algorithmus übertragen. In Abbildung 7-2 ist der Ablauf der Optimierungsmethode visualisiert. Zunächst wird das geometrische Modell erstellt. Dabei ist der Designraum in einzelne Elemente aufgeteilt (vgl. Abbildung 7-1). Anschließend wird eine zufällige Ausgangspopulation gebildet und den einzelnen Elementen der Topologie entweder ein leitender Werkstoff oder keine Leitfähigkeit zugeordnet. Um den Fitnesswert für jedes Individuum zu berechnen, wird mittels *Comsol Multiphysics* eine elektrische FE-Simulation durchgeführt und die Anzahl der leitfähigen Elemente zur Bestimmung der Fläche des Zellverbinders herangezogen. Auf Basis

der Zielfunktionswerte werden mittels der genetischen Operatoren Selektion, Mutation und Rekombination neue nachfolgende Generationen generiert. Die daraus hervorgehenden Nachkommen ersetzen die Ausgangspopulation und bilden die neue Generation. Die elektrische Simulation und die Fitnessbewertung werden ebenfalls für die nächsten Generationen durchgeführt. Nach der Prüfung, ob ein Abbruchkriterium erfüllt ist oder nicht, wird entweder die Optimierung abgebrochen oder eine neue Generation nachfolgender Individuen generiert. Dieser iterative Prozess wird solange wiederholt, bis entweder der Fitnesswert der besten Lösung einen Schwellwert unterschreitet oder bis die Anzahl der Iterationszyklen einen definierten Maximalwert übersteigt.

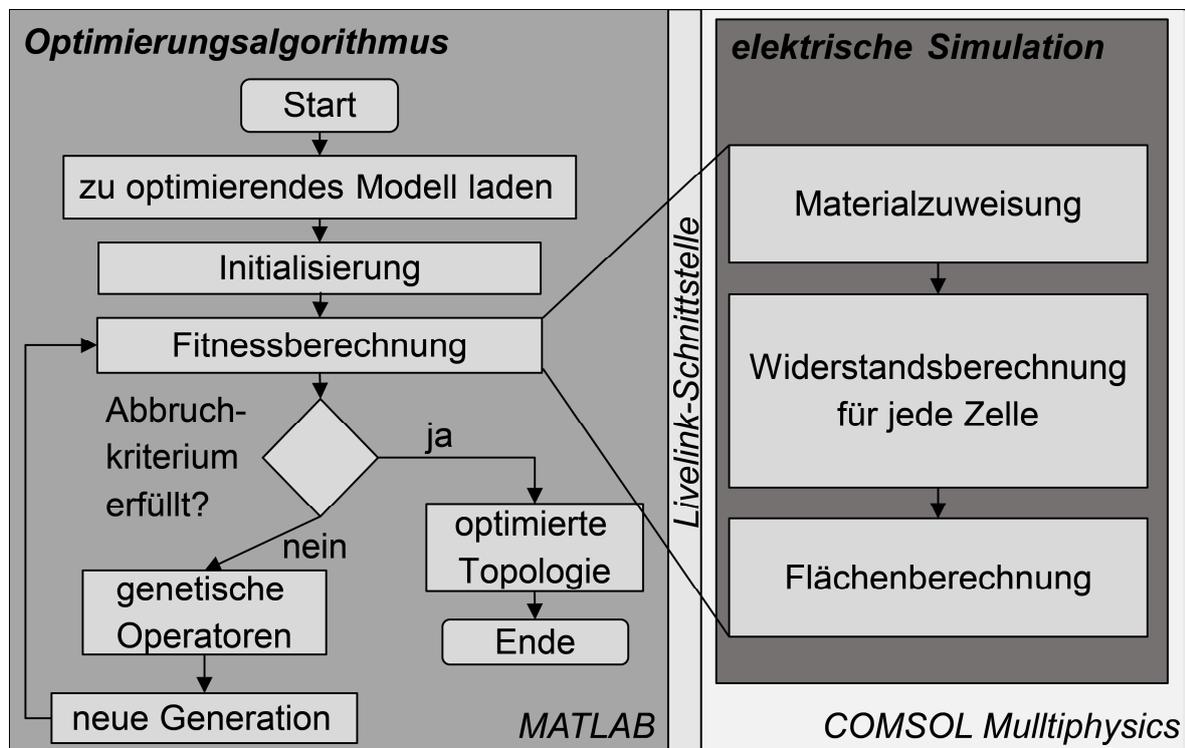


Abbildung 7-2: Programmablaufplan der implementierten Methode zur Topologieoptimierung von Zellverbindern

## 7.2.2 Elektrische Modellbildung

Zur Berechnung des Stromflusses im Zellverbinder wurde die FE-Software *Comsol Multiphysics* mit dem Physikmodul *elektrische Ströme* verwendet. Da der Zellverbinder aus einem Blech mit konstanter Dicke besteht und der Leitungsquerschnitt sehr gering im Verhältnis zur Bauteilfläche ist, kann die Geometrie für die Modellierung als 2D-Geometrie abgebildet werden. Die Werkstoffgruppe Kupfer wurde verwendet, um den geometrischen Elementen leitfähige Eigenschaften zuzuordnen. Die im Mo-

dell verwendeten Parameter sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst. Temperaturabhängigkeiten der Eigenschaften des Werkstoffs können vernachlässigt werden, da, aufgrund des Linienkontakts sowie der verhältnismäßig kleinen Stromdichten im Zellverbinder, keine signifikante Erwärmung des Bauteils auftritt. Die Vernetzung der Geometrie wurde automatisiert durchgeführt. Es wurde ein freies Dreiecksnetz mit einer Maschenweite von maximal 5,750 mm und minimal 0,115 mm gewählt (vgl. Abbildung 12-3 in Anhang A5). Für alle drei Verbindungsstellen wurde eine konstante Stromeinspeisung von 3 A definiert. Der Anschlussstelle wurde ein elektrisches Potenzial von 0 V zugeordnet. Da in der Betrachtung keine zeitliche Veränderung des Stromflusses umgesetzt werden muss, wurde eine stationäre Studie zur Berechnung des Modells verwendet.

Tabelle 7-1: *Parameter der elektrischen FE-Simulation*

Parameter	Einheit	Kupfer	nicht leitend
elektrische Leitfähigkeit $\sigma$	S/m = 1/( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$6 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^{-12}$
stoffabhängige relative Permittivität $\epsilon_r$	-	1	4,2
Permeabilitätszahl $\mu_r$	-	1	1
Referenztemperatur $T_R$	K	293,15	293,15
Radius der Verbindungsstelle $r_V$	mm	2	2
Radius der Anschlussstelle $r_A$	mm	3	3

Im Rahmen der FE-Simulation wurde der elektrische Widerstand im Inneren des Bauteils mittels Potenzialdifferenz zwischen zwei Punkten der Geometrie und eines gegebenen Stroms bestimmt. Die folgenden Grundgleichungen sind in der elektrischen FE-Simulation implementiert.

Der elektrische Strom  $I$  kann über das elektrische Feld  $\vec{E}$  bestimmt werden:

$$I = \iint_0^A \vec{J} \, d\vec{A} = \sigma \iint_0^A \vec{E} \, d\vec{A} \quad (7-1)$$

Das elektrische Feld wird dabei über die elektrische Stromdichte  $\vec{J}$  und die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  berechnet:

$$\vec{E} = \frac{\vec{J}}{\sigma} \quad (7-2)$$

Für die Bestimmung des elektrischen Potentials  $U_{1,2}$  zwischen den Punkten  $x_1$  und  $x_2$  wird das elektrische Feld entlang der Feldlinien zwischen diesen Punkten integriert:

$$U_{1,2} = \int_{\bar{x}_1}^{\bar{x}_2} \vec{E} \, d\vec{s} \quad (7-3)$$

Der elektrische Widerstand folgt dann gemäß dem Ohmschen Gesetz aus der elektrischen Spannung und dem elektrischen Strom:

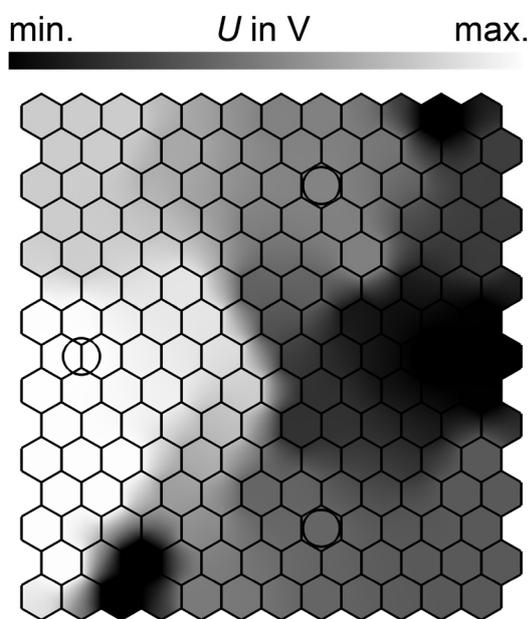
$$R = \frac{U}{I} \quad (7-4)$$

Wird ein konstanter Stromfluss ohne Zeitänderung angenommen, so gilt der stationäre Fall des Kontinuitätsgleichgewichts. Aufgrund der Ladungserhaltung ist die Ladungsdichte im Leiter konstant:

$$0 = \nabla \cdot \vec{j} \quad (7-5)$$

Ein mittels FE-Simulation auf Grundlage einer Startpopulation von zufällig verteilten leitenden Elementen (Abbildung 7-3 b)) berechnetes elektrisches Potenzial ist in Abbildung 7-3 a) dargestellt.

a) elektrisches Potenzial



b) Topologie des Zellverbinders

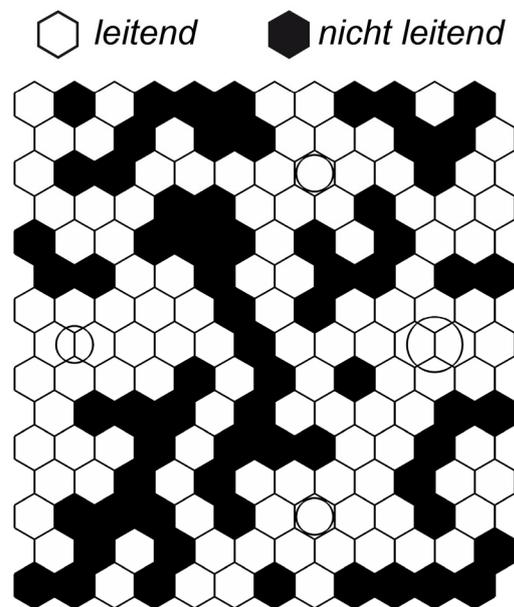


Abbildung 7-3: a) elektrisches Potenzial und b) Topologie eines Individuums der Startpopulation mit einer zufälligen Verteilung von Elementen mit leitendem Werkstoff

### 7.2.3 Charakteristik des Genetischen Algorithmus

Der Genetische Algorithmus wurde mittels der *Global Optimization Toolbox* in *MATLAB* implementiert und über das Modul *LiveLink for MATLAB* als Schnittstelle mit *Comsol Multiphysics* verknüpft. Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften des Algorithmus dargelegt. Zunächst wird das Vorgehen bei der Kodierung und der Initialisierung erläutert. Anschließend wird die verwendete Zielfunktion beschrieben, welche die Basis für die verwendeten Operatoren der Selektion und der Reproduktion darstellt. Abschließend wird auf das Abbruchkriterium zum Beenden des Algorithmus eingegangen.

#### Kodierung und Initialisierung

Die Zuweisung der Werkstoffeigenschaften ist schematisch anhand von neun Genen pro Individuum in Abbildung 7-4 veranschaulicht. Zunächst muss der Vektor dekodiert werden. Dafür wird allen Elementen des Zellverbinders in *COMSOL* eine Nummer zugewiesen. Damit einem Element eine Werkstoffeigenschaft zugeordnet werden kann, muss dessen Gebietsnummer in einem Zuordnungsarray angegeben werden. Die Gebietsnummern der Elemente werden demnach in einen Vektor geladen, dessen Größe der Anzahl der Elemente entspricht. Da in der Anwendung den Elementen entweder Eigenschaften von Kupfer oder nicht leitende Eigenschaften zugeordnet werden können, werden zwei Zuordnungsarrays erstellt. Anhand der generierten Zuordnungsarrays werden für die hexagonalen Elemente die jeweiligen Werkstoffeigenschaften implementiert. Anschließend kann das FE-Modell für die entsprechende Topologie berechnet werden.

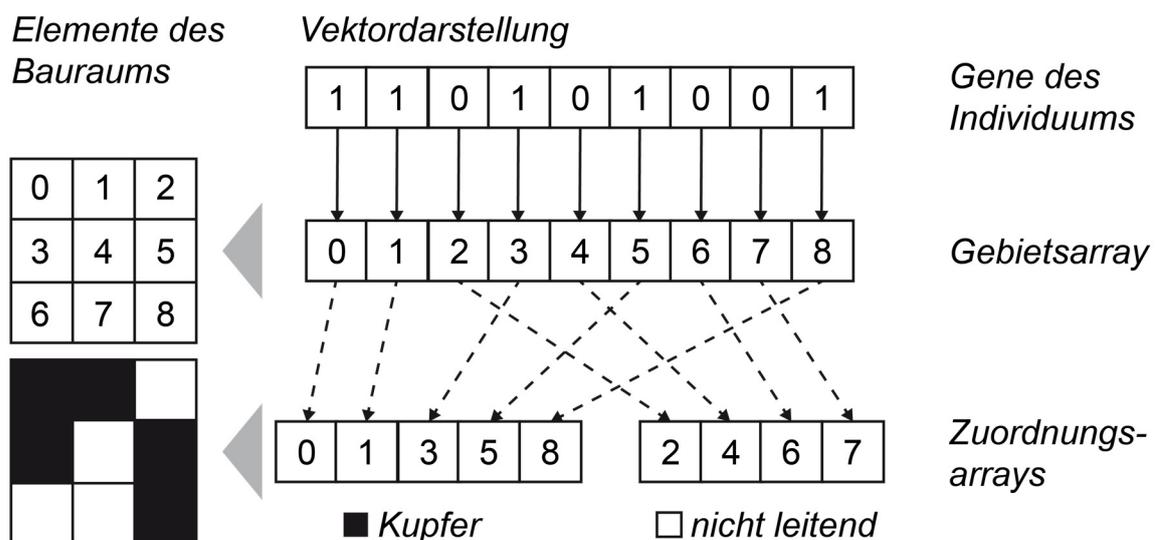


Abbildung 7-4: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Werkstoffzuweisung am Beispiel von neun Genen

Für die Optimierung wird ein Referenzmodell benötigt. Die Zielgrößen des Referenzmodells werden für die Normierung der Zielfunktion der einzelnen Individuen herangezogen. Die Normierung ermöglicht die multikriterielle Optimierung hinsichtlich verschiedener physikalischer Zielgrößen in einer Zielfunktion. Das Referenzmodell ist dadurch definiert, dass allen Elementen im Optimierungsbereich Kupfer zugeordnet wird. Aufgrund der maximal möglichen Zuordnung des leitenden Werkstoffs nimmt der Wert für den mittleren Widerstand den im Rahmen der Optimierung kleinstmöglichen Wert an. Die Fläche des Zellverbinders hingegen weist den maximal möglichen Wert auf. In Abbildung 7-5 sind das elektrische Potenzial und die Ergebnisse des Referenzmodells der innerhalb dieses Kapitels betrachteten Geometrie dargestellt. Nach der Berechnung des Referenzmodells wird die Ausgangspopulation erzeugt, indem zufällige binäre Vektoren verwendet werden.

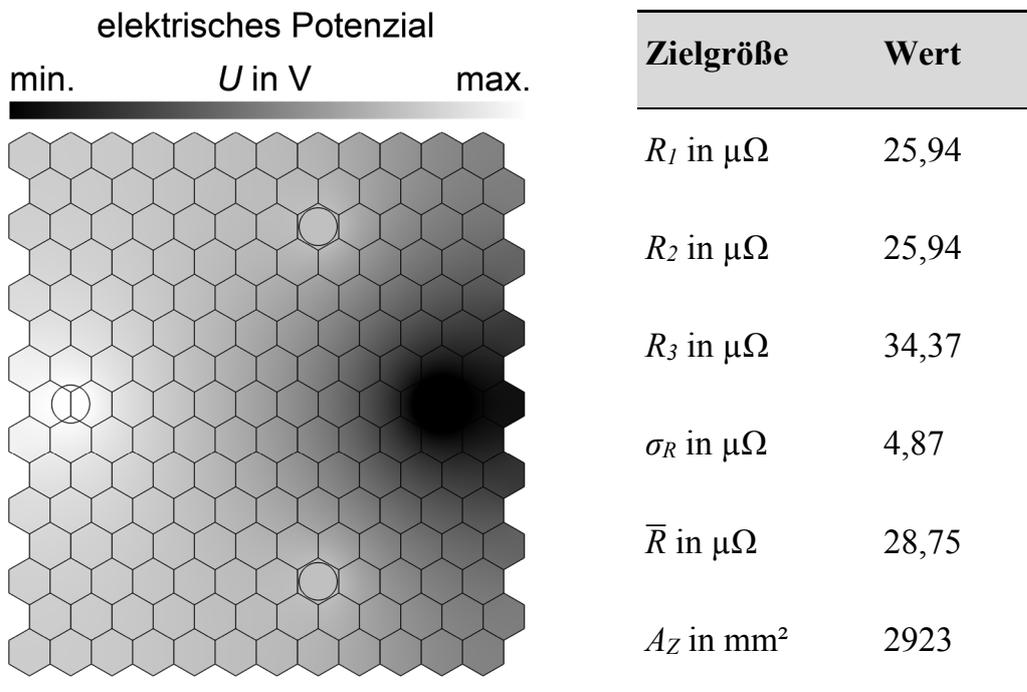


Abbildung 7-5: Elektrisches Potenzial des Referenzmodells der Geometrie aus Abbildung 7-1 und die resultierenden Zielgrößen für die Normierung der Zielfunktion bei der Fitnessberechnung; Stromeinspeisung je Verbindungsstelle  $I = 3 \text{ A}$ ; Simulationsparameter gemäß Tabelle 7-1

### Definition der Zielfunktion

Nach der Ausführung des Simulationsmodells für jedes Individuum (vgl. Abschnitt 7.2.2) werden die resultierenden Widerstände und die Anzahl der leitfähigen Elemente an die Fitnessfunktion übertragen, um den Fitnesswert zu berechnen. Die Zielfunktion ist dabei als multikriterielles Minimierungsproblem formuliert (vgl. Formel (7-6)). Alle Optimierungsziele, die Nivellierung der Widerstände (I), die Minimierung des Gesamtwiderstandes (II) und die Minimierung der Fläche (III), werden in einer gewichteten Zielfunktion zusammengefasst und somit jedem Individuum ein Fitnesswert zugeordnet. Der Zielfunktionswert wird dabei als Funktion aus den Zielgrößen *I*, *II* und *III* sowie den Gewichtungsfaktoren  $w_1$ ,  $w_2$  und  $w_3$  berechnet. Es gilt:

$$Z_F = w_1 \cdot I + w_2 \cdot II + w_3 \cdot III \quad \text{mit} \quad \sum_{n=1}^3 w_n = 1 \quad (7-6)$$

Die Zielgröße *I* repräsentiert die Nivellierung der Widerstände innerhalb des Zellverbinders. Dazu wird der Quotient der Varianz der Widerstände *V* im aktuellen Individuum und im Referenzmodell berechnet. Es gilt:

$$I = \frac{V(\text{Individuum})}{V(\text{Referenzmodell})} \quad (7-7)$$

Für die zweite Zielgröße *II* wird der mittlere Widerstand  $\bar{R}$  zwischen den Verbindungsstellen und der Anschlussstelle auf den entsprechenden Wert des Referenzmodells normiert. Es gilt:

$$II = \frac{\bar{R}(\text{Individuum})}{\bar{R}(\text{Referenzmodell})} \quad (7-8)$$

Die dritte Zielgröße *III* wird mithilfe der Gesamtfläche des Zellverbinders  $A_Z$  berechnet. Die Gesamtfläche ergibt sich aus der Summe der leitenden Elemente, multipliziert mit dem Flächeninhalt eines Elements. Der Zielwert wird anschließend über die Fläche des Referenzmodells normiert. Es gilt:

$$III = \frac{A_Z(\text{Individuum})}{A_Z(\text{Referenzmodell})} \quad (7-9)$$

Die gleichzeitige Minimierung aller drei Zielgrößen bedeutet einen Zielkonflikt. So ist beispielsweise eine geringe Fläche in Bezug auf die Zielgröße *III* zu bevorzugen, wohingegen für die Minimierung des mittleren Widerstands für die Zielgröße *II* eine große Fläche förderlich ist. Auch ist eine möglichst geringe Varianz der Widerstände nur zu erreichen, wenn einzelne Widerstände der Verbindungsstellen in Bezug auf den minimal erreichbaren Wert (abgebildet im Referenzmodell) erhöht werden. Aus diesem Grund kommt den Gewichtungsfaktoren bei der Bewertung der Individuen

eine entscheidende Rolle zu. Die Gewichtungsfaktoren dienen dazu, die Ausprägung der Ergebnisgeometrie hinsichtlich der drei Zielgrößen zu definieren. Die Nivellierung der Widerstände im Zielwert  $I$  ist über die Varianz implementiert. Der quadratische Einfluss dieser Zielgröße auf die Zielfunktion führt dazu, dass bereits bei einer Gleichgewichtung der Werte ( $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$ ,  $w_3 = 1/3$ ) diese Größe eine höhere Auswirkung auf die Zielfunktion hat.

### **Selektion und Reproduktion**

Die Reproduktion setzt sich aus dem Elitismus, der Rekombination und der Mutation zusammen. Zur Umsetzung des Elitismus werden die zehn besten Individuen unverändert in die Folgegeneration überführt. Für die Rekombination wird die verstreute Rekombination verwendet, bei der die Erbinformationen zweier Elternteile willkürlich vermischt werden. Die Selektion der Elternteile erfolgt über eine zum Fitnesswert proportionale Auswahlwahrscheinlichkeit (engl. *stochastic universal sampling*). Die Rekombinationsrate ist mit 0,8 festgelegt, was bedeutet, dass bei einer Populationsgröße von beispielsweise 100 die Anzahl der Nachkommen, die durch Rekombination gebildet werden,  $(100-10) \cdot 0,8 = 72$  beträgt. Daraus folgt, dass 18 Individuen mittels Mutation erzeugt werden. Für die Mutation wird ein zweistufiger Prozess angewendet. Zunächst wählt der Algorithmus einen Bruchteil der Vektoreinträge eines Individuums aus, wobei jeder Eintrag eine Wahrscheinlichkeit von 0,01 für die Mutation aufweist. Im zweiten Schritt tauscht der Algorithmus jeden ausgewählten binären Wert des Vektors von 0 auf 1 bzw. von 1 auf 0.

Individuen ohne leitfähige Verbindung zwischen den Verbindungsstellen und der Anschlussstelle wird ein sehr hoher Zielfunktionswert zugewiesen, sodass diese bei der weiteren Optimierung ausgetauscht werden. Alle relevanten Daten und die grafische Darstellung des elektrischen Potenzials des besten Individuums pro Generation werden durch eine Ausgabefunktion gespeichert.

### **Abbruchkriterien**

Im Algorithmus wurden zwei verschiedene Abbruchkriterien implementiert, wobei das Erreichen eines dieser Kriterien die Optimierung beendet. Erreicht die Anzahl an Generationen einen Wert von 600, wird die Optimierung unabhängig vom Fitnesswert abgebrochen. Darüber hinaus führt auch ein gleichbleibender minimaler Zielfunktionswert über 50 Generationen zum Ende des Prozesses.

Die grundlegenden Einstellungen des Algorithmus für die Optimierungsmethode sind in Tabelle 7-2 aufgeführt.

Tabelle 7-2: *Grundlegende Einstellungen der Global Optimization Toolbox für die Optimierungsmethode*

<b>Eigenschaft</b>	<b>Wert</b>
Populationstyp	bitstring
Populationsgröße	300
Fitness-Skalierungsfunktion	fitscalingrank
Elitengröße	15
Selektionsfunktion	stochastic uniform
Rekombinationsfunktion	crossover scattered
Rekombinationsanteil	0,8
Mutationsfunktion	mutation uniform
minimale Anzahl an Generationen	50
maximale Anzahl an Generationen	600

### 7.3 Multikriterielle Optimierung des Zellverbinders

In diesem Abschnitt wird die Optimierung der Referenzgeometrie aus Abbildung 7-1 vorgestellt. Zunächst wurde eine grundlegende Optimierung durchgeführt, um die optimale Topologie anzunähern. Anschließend wurde mittels Feinoptimierung ein Ergebnis erzielt, aus welchem eine fertige Geometrie abgeleitet werden konnte. Dieser zweistufige Ansatz führt zu einer schnelleren Lösungsfindung, da im ersten Schritt die Anzahl der Freiheitsgrade eingeschränkt werden kann und somit die Rechenzeit reduziert wird.

#### 7.3.1 Grundlegende Optimierung

Für die grundlegende Optimierung wurde die in Abschnitt 7.2 vorgestellte Methode mit den dort angegebenen Parametern verwendet. Die Gewichtungsfaktoren waren:  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$  und  $w_3 = 1/3$ . In Abbildung 7-6 sind die besten Individuen aus drei verschiedenen Generationen visualisiert. Für die Generation 1 ist zu erkennen, dass die Topologie im Wesentlichen einer zufälligen Anordnung entspricht (vgl. Abbildung 7-6 a)). Mittels der Operatoren des Genetischen Algorithmus kann der Zielfunktionswert innerhalb der nachfolgenden 20 Generationen von 1,93 auf 0,77 verbessert werden. Die in Abbildung 7-6 b) dargestellte Topologie nach 20 Generationen weist im Vergleich zu Abbildung 7-6 a) eine Häufung von leitendem Werkstoff in der Mitte

des Designraums auf. Es ist jedoch keine definierte Form zu erkennen. Die Optimierung wurde nach 140 Generationen abgebrochen, da innerhalb von 50 Generationen keine weitere Verbesserung des Zielfunktionswerts erzielt wurde. Das beste Individuum ist in Abbildung 7-6 c) gezeigt. Es ist zu erkennen, dass eine deutlich breitere Verbindung in der Mitte des Designraums existiert, wohingegen die Verbindungsstellen 1 und 2 über jeweils zwei deutlich dünnere Verbindungen zur Anschlussstelle verfügen. Diese zwei verschiedenen Verbindungswege können mit der Quantelung der Verbindungsfläche in Einheiten des Flächeninhalts der Hexagone begründet werden: Um einen möglichst gleichen Widerstand zu erreichen, müsste die Verbindungsfläche geringfügig vergrößert werden. Da in dem vorliegenden Fall nur eine Verdopplung möglich ist, weist das Ergebnis eine zweite längere Verbindung auf, um den Verbindungswiderstand geringfügig zu reduzieren. Weiterhin gibt es im Gegensatz zu den anderen beiden Individuen keinen Werkstoff, der vom Stromfluss isoliert ist. Das Ergebnis weist eine Symmetrie auf, was aufgrund der symmetrischen Problemstellung auf eine funktionierende Optimierung hindeutet. Der Zielfunktionswert nach 140 Generationen betrug 0,63.

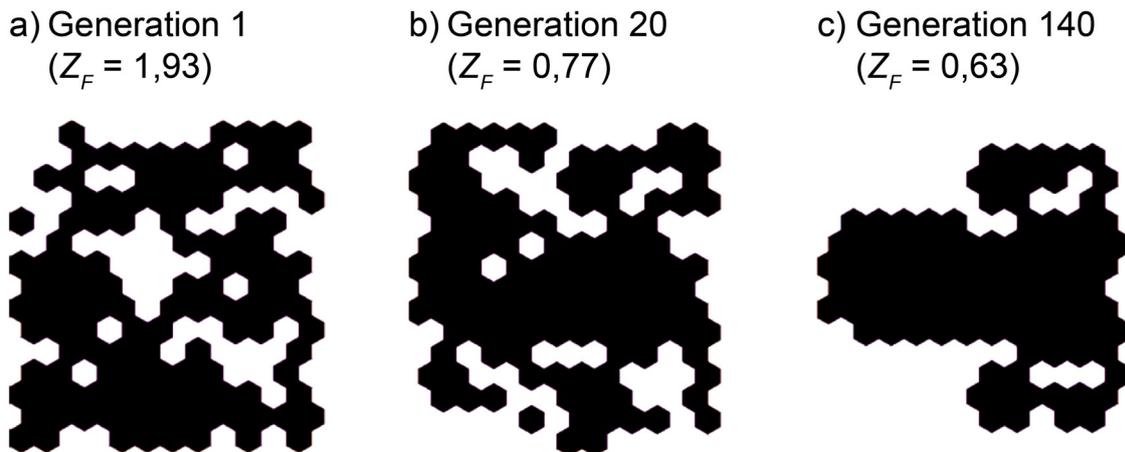


Abbildung 7-6: Entwicklung der Topologie der besten berechneten Individuen anhand von drei verschiedenen Generationen für die Optimierung der Geometrie aus Abbildung 7-1 (Gewichtungsfaktoren:  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$ ,  $w_3 = 1/3$ )

In Abbildung 7-7 ist die Konvergenz des Zielfunktionswerts über die Generationen veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass zu Beginn der Optimierung der Mittelwert von  $Z_F$  sowie der entsprechende Wert des besten Individuums innerhalb von wenigen Generationen stark reduziert wurden. So wurde bereits nach 35 Generationen ein Zielfunktionswert erreicht, welcher weniger als 10 % von dem Wert abweicht, der zum Ende der Optimierung erzielt wurde.

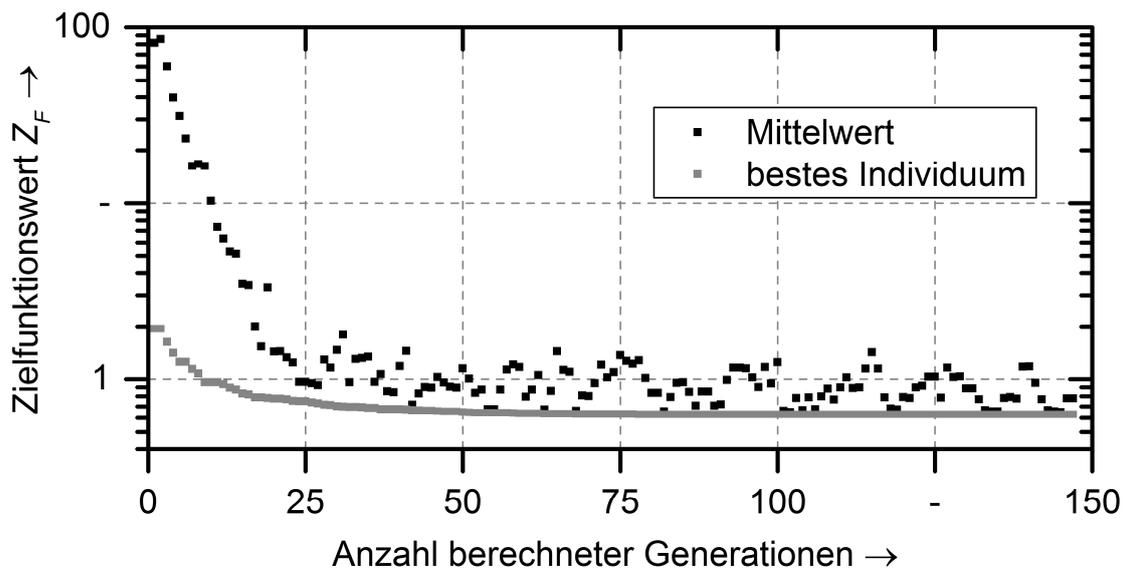


Abbildung 7-7: Konvergenzverhalten der Zielfunktion bei der Optimierung der Geometrie aus Abbildung 7-1

Abbildung 7-8 zeigt das Ergebnis der elektrischen Optimierung nach 140 Generationen und die resultierenden Zielgrößen. Das elektrische Potenzial aller drei Verbindungsstellen ist nahezu identisch, was auf einen gleichmäßigen Verbindungswiderstand hinweist. Dies kann anhand der Zielgrößen  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  und ihrer Standardabweichung bestätigt werden. Im Vergleich zu einem vollständig mit Werkstoff ausgefüllten Designraum wurde die Standardabweichung von  $4,04 \mu\Omega$  auf  $0,44 \mu\Omega$  und die Fläche von  $2923 \text{ mm}^2$  auf  $1575 \text{ mm}^2$  reduziert. Weiterhin wurde der mittlere Widerstand von  $34,74 \mu\Omega$  auf  $47,32 \mu\Omega$  vergrößert (vgl. Abbildung 7-5).

### Variation der Gewichtungsfaktoren

Die in Formel (7-6) zur Berechnung des Zielfunktionswerts vorhandenen Gewichtungsfaktoren ( $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$ ) bestimmen die Ausprägung der Topologie in Bezug auf die Zielwerte. Um die Auswirkung der Gewichtungsfaktoren zu überprüfen, wurden zwei weitere Simulationen durchgeführt, bei denen zum einen ein kleiner Widerstand ( $w_1 = 0,2$ ,  $w_2 = 0,6$ ,  $w_3 = 0,2$ ) und zum anderen eine geringe Fläche ( $w_1 = 0,2$ ,  $w_2 = 0,2$ ,  $w_3 = 0,6$ ) jeweils höher gewichtet wurden. In Abbildung 7-9 sind die Ergebnisse dieser elektrischen Optimierungen gezeigt und in Tabelle 7-3 die resultierenden Zielgrößen genannt.

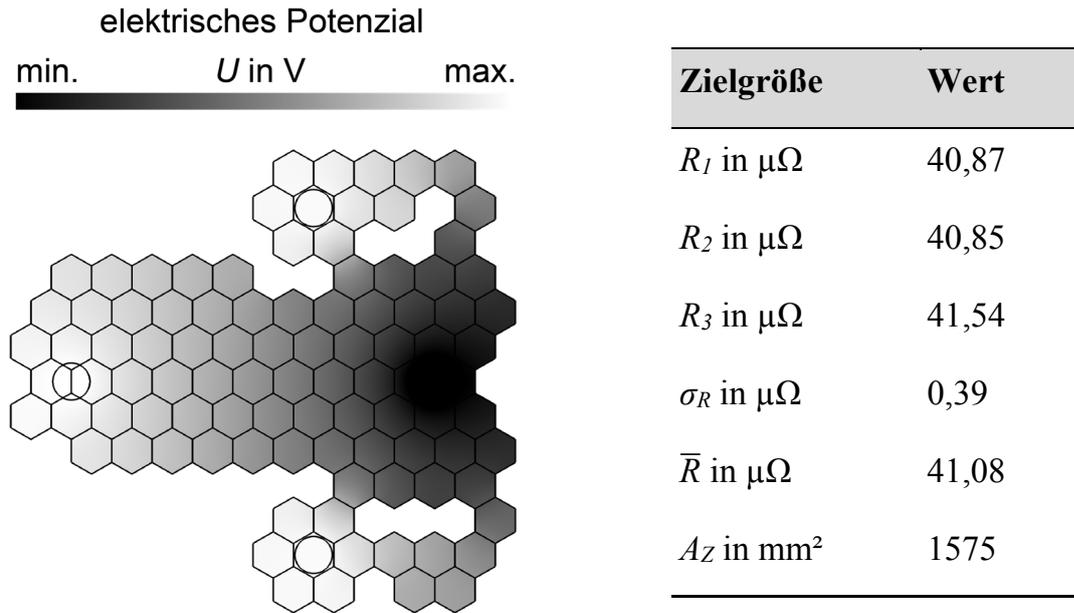


Abbildung 7-8: Ergebnis der elektrischen Optimierung und die resultierenden Zielgrößen für die Geometrie aus Abbildung 7-1 (Gewichtungsfaktoren:  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$ ,  $w_3 = 1/3$ )

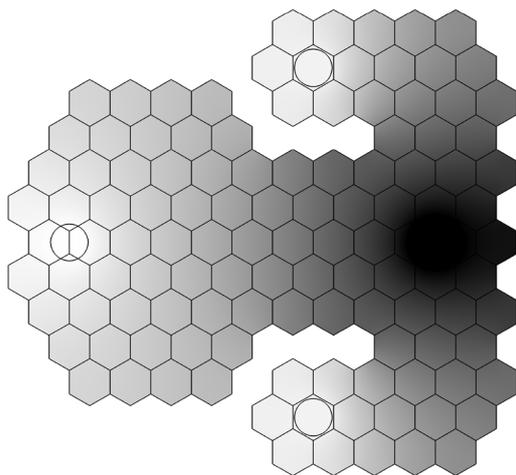
In Abbildung 7-9 a) ist zu erkennen, dass der geringere Widerstand im Wesentlichen über eine größere Querschnittsfläche der Verbindungen zwischen den drei Verbindungsstellen und der Anschlussstelle realisiert wurde. Dies spiegelt sich in einem Flächeninhalt von  $1916 \text{ mm}^2$  wider. Durch die Optimierung konnte eine Standardabweichung der Widerstände von  $1,04 \mu\Omega$  bei einem mittleren Widerstand von  $34,67 \mu\Omega$  erreicht werden. Im Vergleich dazu weist das Ergebnis für die höhere Gewichtung der Fläche den kleinsten Flächeninhalt von  $1218 \text{ mm}^2$  auf (vgl. Abbildung 7-9 b)). Die Standardabweichung der Widerstände ist mit  $0,15 \mu\Omega$  deutlich geringer, was jedoch in einem höheren mittleren Widerstand von  $46,73 \mu\Omega$  resultierte. Insgesamt konnte durch Veränderung der Gewichtungsfaktoren die Ergebnisgeometrie so beeinflusst werden, dass bestimmte höher gewichtete Zielfunktionswerte andere Ergebnisse erreichen. Dies ist ein entscheidendes Merkmal für eine funktionsgerechte Auslegung von Zellverbindern.

Tabelle 7-3: Resultierende Zielgrößen bei der elektrischen Optimierung der Geometrie aus Abbildung 7-1 mit der höheren Gewichtung des mittleren Widerstands und der Fläche

höhere Gewichtung	$R_1$ in $\mu\Omega$	$R_2$ in $\mu\Omega$	$R_3$ in $\mu\Omega$	$\sigma_R$ in $\mu\Omega$	$\bar{R}$ in $\mu\Omega$	$A_Z$ in $\text{mm}^2$
mittlerer Widerstand	34,06	34,07	35,87	1,04	34,67	1916
Fläche	46,86	46,57	46,76	0,15	46,73	1218

a) höhere Gewichtung:  
Mittlerer Widerstand

elektrisches Potenzial  
min.  $U$  in V max.



b) höhere Gewichtung:  
Fläche

elektrisches Potenzial  
min.  $U$  in V max.

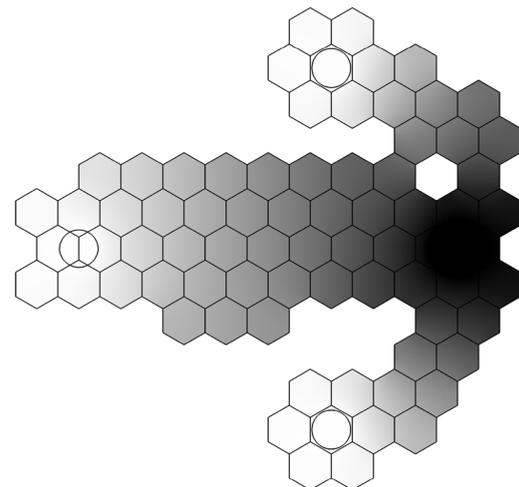


Abbildung 7-9: Ergebnisse der elektrischen Optimierungen der Geometrie aus Abbildung 7-1; a) Gewichtungsfaktoren:  $w_1 = 0,2$ ,  $w_2 = 0,6$ ,  $w_3 = 0,2$ ; b) Gewichtungsfaktoren:  $w_1 = 0,2$ ,  $w_2 = 0,2$ ,  $w_3 = 0,6$

### 7.3.2 Feinoptimierung

Um die Effizienz des Optimierungsvorgangs und die Wahrscheinlichkeit des Erreichens eines symmetrischen und globalen Optimums zu erhöhen, wird die grundlegende Optimierung nach einer bestimmten Anzahl von Generationen oder bei einer vorzeitigen Konvergenz der Zielfunktion abgebrochen und eine Feinoptimierung auf Basis der besten Lösung der grundlegenden Optimierung durchgeführt. Für die

zweite Optimierung werden die Elemente des Optimierungsbereichs manuell ausgewählt, um die Gene dieser Optimierung zu bilden. Die Grundstruktur der Topologie wird nicht mehr weiter verbessert, was die Anzahl der Freiheitsgrade deutlich reduziert. Dadurch wird die Suche nach einem globalen Optimum beschleunigt. Die für die Feinoptimierung auszuwählenden Elemente spielen jedoch eine entscheidende Rolle für die resultierende Geometrie und werden nach den folgenden Kriterien bestimmt:

- **Symmetrie:** Bei einer symmetrischen Problemstellung muss das Referenzmodell ebenfalls symmetrisch sein, um eine symmetrische Lösung zu ermöglichen.
- **Verengungen:** Verbindungen, die der Bereite eines Hexagons entsprechen, müssen lokal verbreitert werden können. Dies erfordert eine präzisere Darstellung der Geometrie (Unterteilung der Hexagone in feiner aufgelöste Elemente).
- **Doppelte Verbindungen:** Redundante, d. h. doppelte Verbindungen werden ausgewählt, um in Kombination mit der lokalen Verbreiterung deaktiviert werden zu können.

Die Verfeinerung wird dadurch realisiert, dass einzelne hexagonale Elemente in neun identische Pentagone unterteilt werden. Dies ist in Abbildung 7-10 a) innerhalb des Referenzmodells für die Feinoptimierung veranschaulicht, welches basierend auf dem Ergebnis in Abbildung 7-8 erstellt wurde. Der ausgewählte Optimierungsbereich ist im Referenzmodell markiert. Für die Optimierung wurde derselbe Algorithmus mit den Parametern gemäß Abschnitt 7.3.1 verwendet. Die Gewichtungsfaktoren waren  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$  und  $w_3 = 1/3$ . Das Ergebnis der Optimierung ist in Abbildung 7-10 b) gezeigt. Aufgrund der lokalen Verfeinerung wurde der redundante Verbindungsweg eliminiert. Die Werte der Zielgrößen, welche in Tabelle 7-4 enthalten sind, zeigen, dass im Vergleich zur grundlegenden Optimierung die Fläche sowie die Standardabweichung der Widerstände reduziert werden konnten. Der mittlere Widerstand ist hingegen aufgrund der reduzierten Fläche um 11% vergrößert.

Tabelle 7-4: Resultierende Zielgrößen des Referenzmodells und des Ergebnisses der Feinoptimierung der Geometrie aus Abbildung 7-8

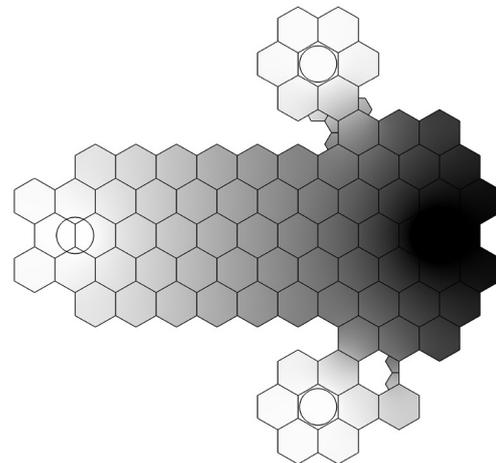
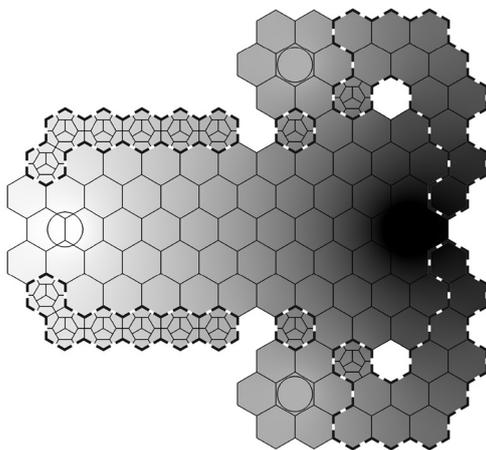
Modell	$R_1$ in $\mu\Omega$	$R_2$ in $\mu\Omega$	$R_3$ in $\mu\Omega$	$\sigma_R$ in $\mu\Omega$	$\bar{R}$ in $\mu\Omega$	$A_Z$ in $\text{mm}^2$
Referenz	27,55	27,55	40,02	7,20	31,71	1802
Ergebnis	45,60	45,52	45,96	0,23	45,69	1245

a) Referenz

b) Ergebnis der Feinoptimierung

elektrisches Potenzial  
min.  $U$  in V max.

elektrisches Potenzial  
min.  $U$  in V max.



Optimierungsbereich

Abbildung 7-10: a) Referenzmodell für die Feinoptimierung der Geometrie aus Abbildung 7-8; b) Ergebnis der Optimierung (Gewichtungsfaktoren:  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$ ,  $w_3 = 1/3$ )

### 7.3.3 Ergebnis der Optimierung

Aufgrund der Verwendung hexagonaler Elemente bei der Topologieoptimierung resultiert eine Geometrie mit ungleichmäßigem Rand. Dies ist ungünstig für die Fertigung des Bauteils und führt zu lokalen Einschnürungen des elektrischen Felds, wodurch eine Erhöhung des elektrischen Widerstands folgt. Deshalb muss der Rand der Geometrie zur Ableitung einer einfach herstellbaren Struktur geglättet werden. In Abbildung 7-11 a) ist verdeutlicht, wie aus dem Ergebnis der Feinoptimierung die finale Geometrie abgeleitet wurde. Hierzu wurde die Symmetrie der Problemstellung ausgenutzt.

Um zu überprüfen, ob die resultierende Geometrie den gestellten Anforderungen entspricht, wurde diese in das FE-Modell geladen und die Zielgrößen wurden berechnet (Abbildung 7-11 b)). Wie in Tabelle 7-5 zu erkennen ist, konnte aufgrund der Symmetrie die Standardabweichung im Vergleich zum Ergebnis der Feinoptimierung um eine Größenordnung reduziert werden. Der Flächeninhalt wurde ebenfalls reduziert. Im Gegensatz dazu wurde der mittlere Widerstand leicht erhöht. Die Zielfunktionswerte der Topologien sind beide mit  $Z_F = 0,71$  identisch. Daraus folgt, dass aus der Optimierung eine fertigbare Geometrie abgeleitet werden konnte.

Tabelle 7-5: Resultierende Zielgrößen der fertigbaren Geometrie aus Abbildung 7-11 b)

Modell	$R_1$ in $\mu\Omega$	$R_2$ in $\mu\Omega$	$R_3$ in $\mu\Omega$	$\sigma_R$ in $\mu\Omega$	$\bar{R}$ in $\mu\Omega$	$A_Z$ in $\text{mm}^2$
fertigbare Geometrie	47,56	47,57	47,71	0,08	47,61	1142

a) Gegenüberstellung der Geometrien      b) FE-Simulation der fertigbaren Geometrie

Ergebnis der Feinoptimierung  
 Fertigbare Geometrie

elektrisches Potenzial  
 min.  $U$  in V max.

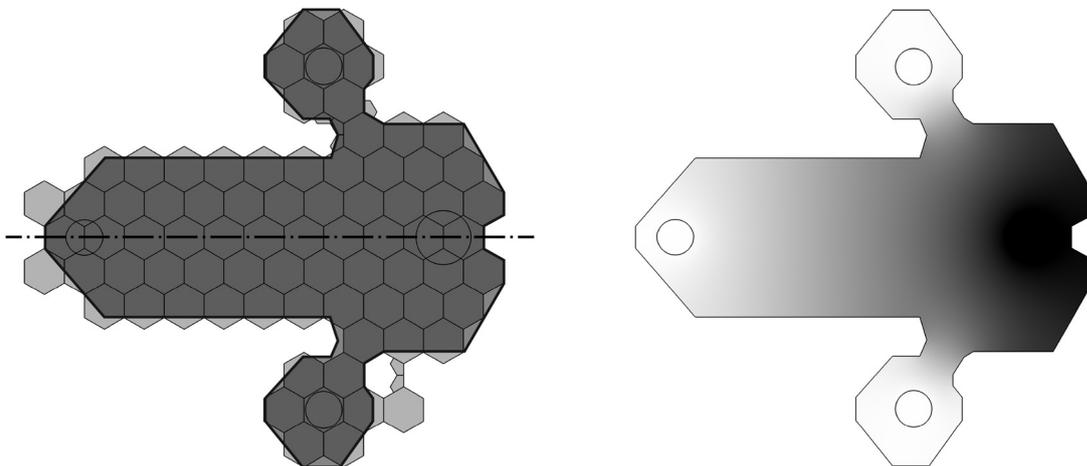



Abbildung 7-11: a) Darstellung der fertigbaren Geometrie auf Grundlage des Optimums der Feinoptimierung in Abbildung 7-10; b) elektrisches Potenzial aus der FE-Simulation der fertigbaren Geometrie

## 7.4 Verifizierung

In diesem Abschnitt wird die auf experimentellen Widerstandsmessungen basierende Verifizierung der Methode beschrieben. Die gemessenen Werte wurden mit den Ergebnissen der Simulation verglichen, um zum einen die FE-Simulation und zum anderen die Gültigkeit der ermittelten Lösung zu verifizieren.

Entsprechend der Ergebnisgeometrie, welche in Abbildung 7-11 b) gezeigt ist, wurde ein Bauteil angefertigt. Als Werkstoff wurde Stahl (AISI 304 / 1.4301) ausgewählt. Aufgrund der geringeren elektrischen Leitfähigkeit im Vergleich zu Kupfer können auf diese Weise die Messfehler relativ zum Messwert reduziert werden. An den Positionen der Verbindungsstellen wurden Spannungen angelegt. Gemessen wurde der Potenzialverlust zwischen diesen Punkten und der Anschlussstelle. Die Widerstände wurden anschließend mittels Formel (7-4) bestimmt. In Abbildung 7-12 ist der Schaltplan des Versuchsaufbaus dargestellt. Zur Spannungsmessung und Stromeinpeisung in das Bauteil wurden Kelvinstifte verwendet. Diese ermöglichen eine kreisförmige Stromeinleitung und über einen zweiten elektrisch isolierten Anschluss eine Spannungsmessung im Zentrum des Kreises. Damit kann eine Vier-Punkt-Leitermessung mit einem separaten Strommessungs- sowie Spannungsmessgerät durchgeführt werden. Für die Strommessung wurde das Gerät *Zimmer Electronic Systems – LMG 450* verwendet, welches drei Eingänge zur Strommessung bereitstellt. Zur Messung der Spannungsdifferenz wurde das Gerät *HIOKI BT3562* eingesetzt. Die externe Stromquelle der Marke *Voltkraft* verfügt über einen Spannungsbereich von  $U = 0 - 30 \text{ V}$  und liefert Stromstärken von  $I = 0 - 3 \text{ A}$ .

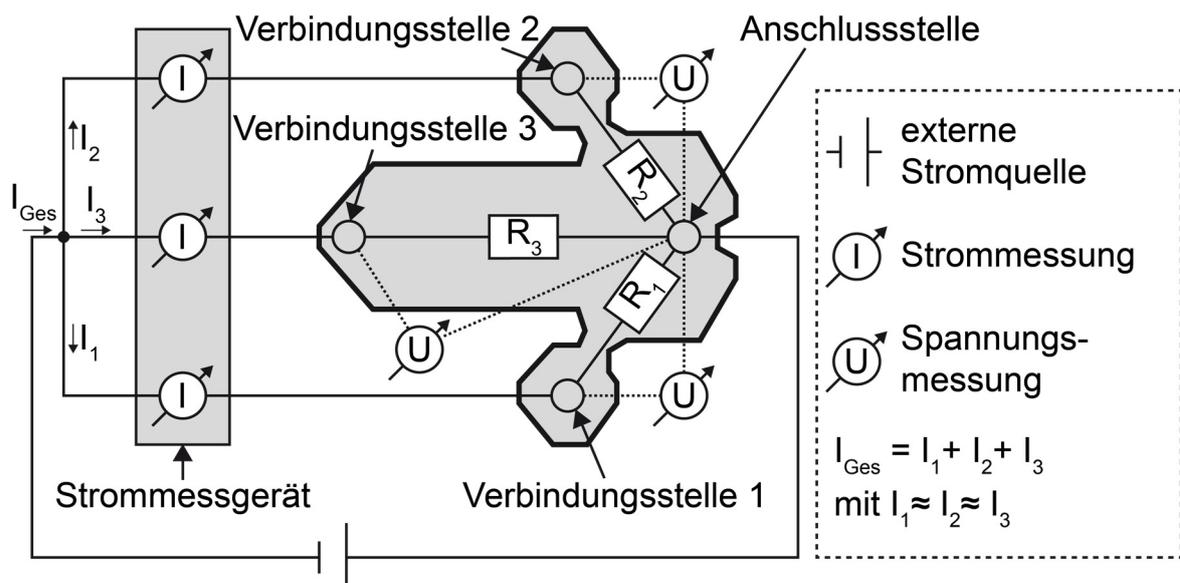


Abbildung 7-12: Schaltplan des Versuchsaufbaus für die Verifizierung des Modells

In Tabelle 7-6 sind die Ergebnisse der Strommessung sowie die Parameter der Simulation des elektrischen Widerstands aufgeführt, die im Rahmen der Verifizierung verwendet wurden. Da die drei Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  sowie die Widerstände der verwendeten Kabel nicht identisch sind, stellen sich im experimentellen Aufbau leicht unterschiedliche Prüfströme ein. Die Abweichungen sind jedoch so gering, dass diese keine signifikanten Auswirkungen auf das Ergebnis haben. Für die Simulation wurden die elektrische Leitfähigkeit des Stahlwerkstoffes und die Radien der Verbindungsstellen sowie der Anschlussstelle angepasst. Dies war notwendig, da die Kelvinstifte eine kreisförmige Kontaktfläche mit einem Radius von 1,6 mm aufwiesen. Die übrigen Parameter der Simulation waren analog zu den in Abschnitt 7.2.2 angegebenen Werten.

*Tabelle 7-6: Ergebnisse der Strommessung sowie die Parameter der Simulation des elektrischen Widerstands für die Verifikation*

<b>Ergebnisse Strommessung</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>
Prüfstrom 1 $I_1$	A	0,764
Prüfstrom 2 $I_2$	A	0,764
Prüfstrom 3 $I_3$	A	0,757
<b>Parameter Simulation</b>	<b>Einheit</b>	<b>Wert</b>
Elektrische Leitfähigkeit $\sigma$	S/m	$1,37 \cdot 10^6$
Radius Verbindungsstelle $r_V$	mm	1,6
Radius Anschlussstelle $r_A$	mm	1,6
Prüfströme 1–3 $I_1, I_2, I_3$	A	1

Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der elektrischen Widerstände aus der Messung und aus der Simulation aufgezeigt werden (vgl. Abbildung 7-13). Kleine Abweichungen können auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden, welche sich insbesondere aus der Positionierung der Messstifte ergeben können. Daraus folgt, dass zum einen die Ergebnisse der Simulation und zum anderen der in diesem Kapitel vorgestellte Algorithmus zur Topologieoptimierung verifiziert sind.

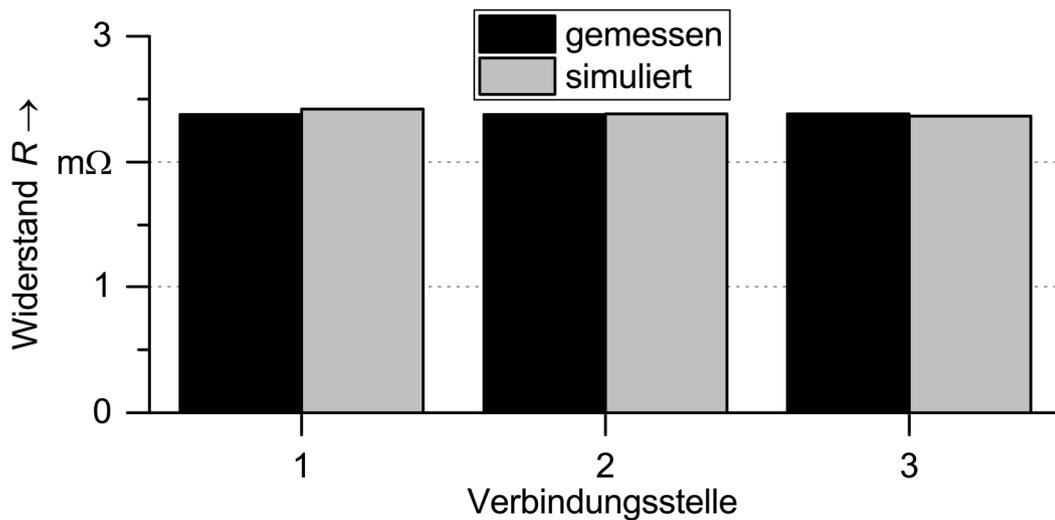


Abbildung 7-13: Gemessene und simulierte Werte für den elektrischen Widerstand der drei Verbindungsstellen

## 7.5 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde eine simulationsgestützte Methode zur Topologieoptimierung des Zellverbinders vorgestellt. Diese Methode ermöglicht es die am besten geeignete Topologie in Bezug auf die drei Zielgrößen, *mittlerer Widerstand*, *Abweichung der Widerstände* sowie *Fläche des Zellverbinders*, zu bestimmen. Die implementierten Gewichtungsfaktoren definieren dabei die Relevanz der einzelnen Zielgrößen und können daher zur funktionsgerechten Auslegung des Zellverbinders angepasst werden. Um die Effizienz des Algorithmus zu steigern, wurde ein zweistufiges Vorgehen vorgestellt. In einer grundlegenden Optimierung wird die grobe Struktur der Topologie festgelegt, wohingegen in der Feinoptimierung Elemente des Optimierungsbereichs manuell ausgewählt sowie in kleinere Elemente untergliedert werden. Abschließend kann aus dem Ergebnis der Feinoptimierung eine fertigmögliche Geometrie abgeleitet werden. Durch Anwendung der Methode konnte ein optimierter Zellverbinder für ein vereinfachtes Modell, bestehend aus drei Verbindungsstellen und einer Anschlussstelle, ausgelegt werden. Die Verifizierung erfolgte durch eine Messung des elektrischen Widerstands des auf Grundlage der Auslegung hergestellten Bauteils.

Die Optimierungsmethode kann für eine beliebige Anzahl oder Geometrie der Verbindungsstellen oder der Anschlussstellen eingesetzt werden. Weiterhin ist das Ergebnis der Methode unabhängig von dem eingesetzten Werkstoff und der Dicke des Zellverbinders. Die Einsatzmöglichkeit dieser Optimierungsmethode schließt damit

die Auslegung der parallelen Verbindung aller Zellformate und Anwendungsbereiche mit ein.

Die Anwendung der Methode zur Optimierung der Topologie des Zellverbinders wird in Abschnitt 8.2 am Beispiel eines Zellverbunds aus zwölf zylindrischen Zellen beschrieben.

## 8 Elektrische Kontaktierung eines Zellverbunds

### 8.1 Allgemeines

Die in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Ergebnisse wurden zusammengeführt, um einen Zellverbund des Energiespeichers *Energy Neighbor* (MÜLLER ET AL. 2017) mit optimierten Ableitern aufzubauen und mittels gepulster Laserstrahlung zu kontaktieren. Der Aufbau des Zellverbunds wurde in Abschnitt 2.2.3 in Abbildung 2-5 vorgestellt. Der Zellverbund besteht aus 24 Zellen, von denen jeweils zwölf parallel verbunden sind. In den folgenden Abschnitten wird zunächst die Validierung der Methode zur simulationsgestützten Topologieoptimierung des Zellverbinders beschrieben. Für die Validierung wurde die Methode auf die neue Problemstellung übertragen und angewendet. Anschließend wurden, entsprechend Abschnitt 5.4, die Anbindungsfläche und die Geometrie der Punktfolge festgelegt. Der Zellverbund wurde durch die Anwendung des in Abschnitt 5.3 vorgestellten Spike-Puls-Schweißprozesses kontaktiert. Den Abschluss dieses Kapitels bilden eine technologische und eine wirtschaftliche Bewertung, für die zum einen der optimierte Zellverbinder mit dem konventionellen Bauteil verglichen sowie zum anderen der Prozess des Laserstrahlschweißens dem Widerstandspunktschweißen gegenüber gestellt wurde.

### 8.2 Auslegung des Zellverbinders

Für die Auslegung des Zellverbinders wurde die in Kapitel 7 vorgestellte Methode angewendet. Hierfür war es zunächst erforderlich, den Designraum und das Simulationsmodell zu definieren. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Kapitel 7 wird der elektrische Strom von sechs Verbindungsstellen durch den Zellverbinder zu zwei verschiedenen Anschlussstellen geleitet. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass eine Zugänglichkeit der zwölf Batteriezellen für die Kontaktierung mit Laserstrahlung gewährleistet ist. Daraus lässt sich für die Optimierung ableiten, dass die Bereiche oberhalb der Zellen nicht mit leitendem Werkstoff versehen werden dürfen. Die vollständige Ausgangssituation ist in Abbildung 8-1 veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass die geometrische Anordnung der funktionsrelevanten Merkmale eine Punktsymmetrie um den Punkt  $M$  aufweist. Aus diesem Grund wurden im Simulationsmodell nur die Quadranten i und ii abgebildet. Das Ergebnis der Simulation kann dann an beiden Achsen gespiegelt und zu einem vollständigen Zellverbinder zusammengefügt werden. Diese Vorgehensweise ist zulässig, da die Anschlussstellen in der Mitte zwischen den Quadranten i und ii sowie iii und iv liegen. Demnach kann davon

ausgegangen werden, dass sich die elektrischen Ströme dieser beiden Quadranten-Paare nicht gegenseitig beeinflussen.

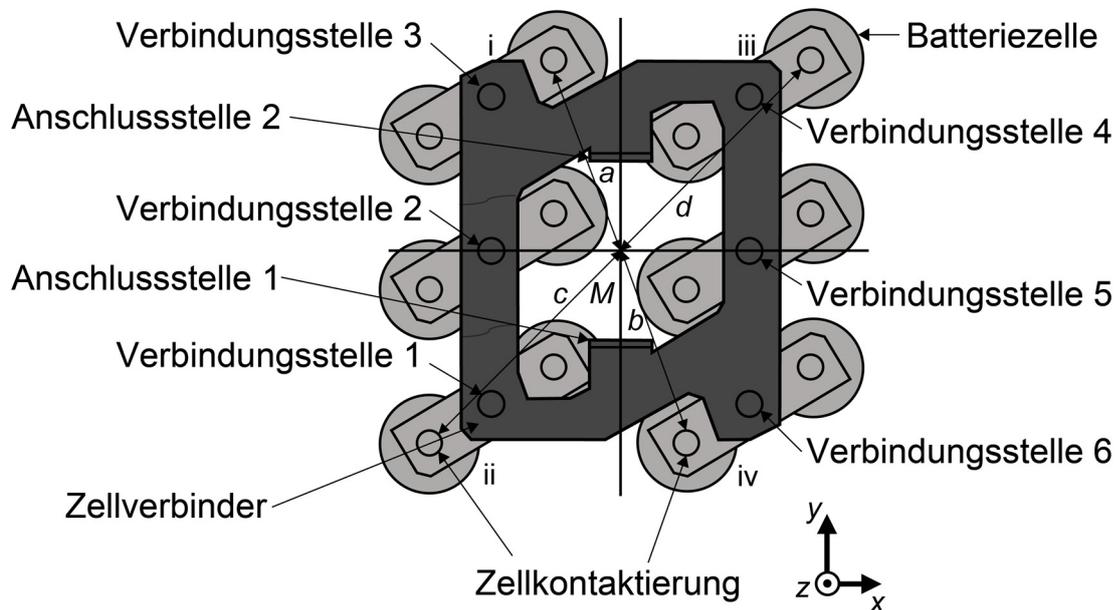


Abbildung 8-1: Ausgangssituation für die Optimierung des Zellverbinders mit sechs Verbindungsstellen; die Punktsymmetrie um den Punkt  $M$  ist anhand der Strecken  $a-d$  und Quadranten  $i-iv$  visualisiert.

Zusätzlich muss beachtet werden, dass sich die Anschlusstellen im Zellverbinder innerhalb eines in Bezug auf die  $x$ - $y$ -Ebene um  $90^\circ$  nach oben gebogenen Teilstücks befinden. Um eine 2D-Simulation durchführen zu können, wurden diese Teilstücke als nicht gebogen abgebildet. Die Knickposition wurde dabei anhand von Referenzlinien bei der Erstellung des Simulationsmodells berücksichtigt.

In Abbildung 8-2 a) ist die Teildarstellung des konventionellen Zellverbinders gezeigt. Das daraus abgeleitete Simulationsmodell mit der Diskretisierung des Designraums in hexagonale Elemente ist in Abbildung 8-2 b) zu sehen. Die Position der Anschlusstellen ist über den Abstand  $e = 3,5$  mm von der Knicklinie definiert. Zusätzlich zu den Elementen, welche immer als leitend festgelegt sind, wurden in der Optimierung die Elemente an den Zellpositionen als immer nichtleitend gesetzt.

Die Parameter der elektrischen FE-Simulation sowie die Einstellungen des Genetischen Algorithmus wurden aus den Abschnitten 7.2.2 und 7.2.3 unverändert übernommen.

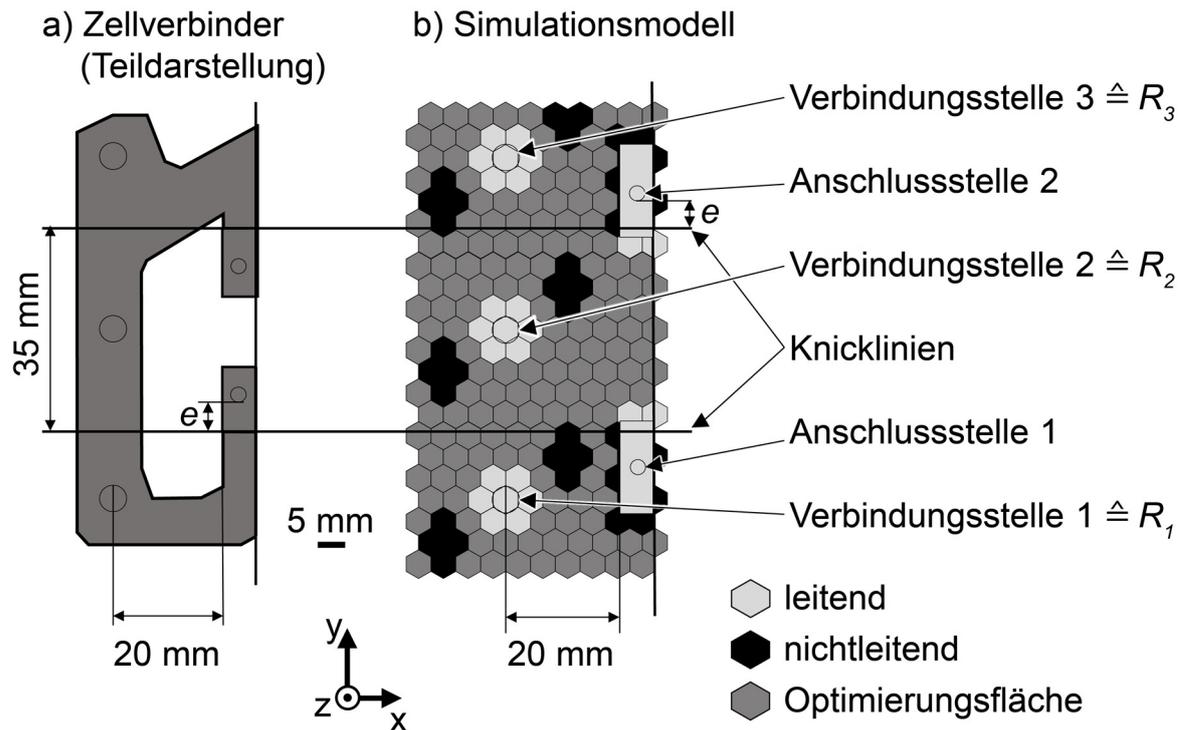


Abbildung 8-2: a) Teildarstellung des Zellverbinders; b) abgeleitetes Simulationsmodell für die Anwendung des Optimierungsalgorithmus; der Abstand  $e = 3,5 \text{ mm}$  definiert die Position der Anschlusstellen in Relation zur Knicklinie.

### 8.2.1 Grundlegende Optimierung

Für die grundlegende Optimierung wurde eine Gewichtung von  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$  und  $w_3 = 1/3$  gewählt. In Abbildung 8-3 sind die besten Individuen aus drei verschiedenen Generationen dargestellt. Der Verlauf der Optimierung ist vergleichbar mit den Ergebnissen aus Abbildung 7-6. Während in der ersten Generation eine zufällige Verteilung an leitenden Elementen zu erkennen ist (vgl. Abbildung 8-3 a)), kann nach 20 Generationen bereits eine zunehmende Verbindung der einzelnen Elemente erkannt werden (vgl. Abbildung 8-3 b)). Nach 280 Generationen wurde die Simulation abgebrochen, da keine weitere Verbesserung des Zielfunktionswerts erreicht wurde. In Abbildung 8-3 c) ist das beste Individuum der Optimierung gezeigt. Im Gegensatz zu den beiden anderen Individuen treten keine Elemente mehr auf, die vom Stromfluss isoliert sind. Für die Verbindungsstelle 1 sind zwei Verbindungen zur Anschlussstelle zu erkennen, die in Abschnitt 8.2.2 anhand der Feinoptimierung genauer untersucht werden.

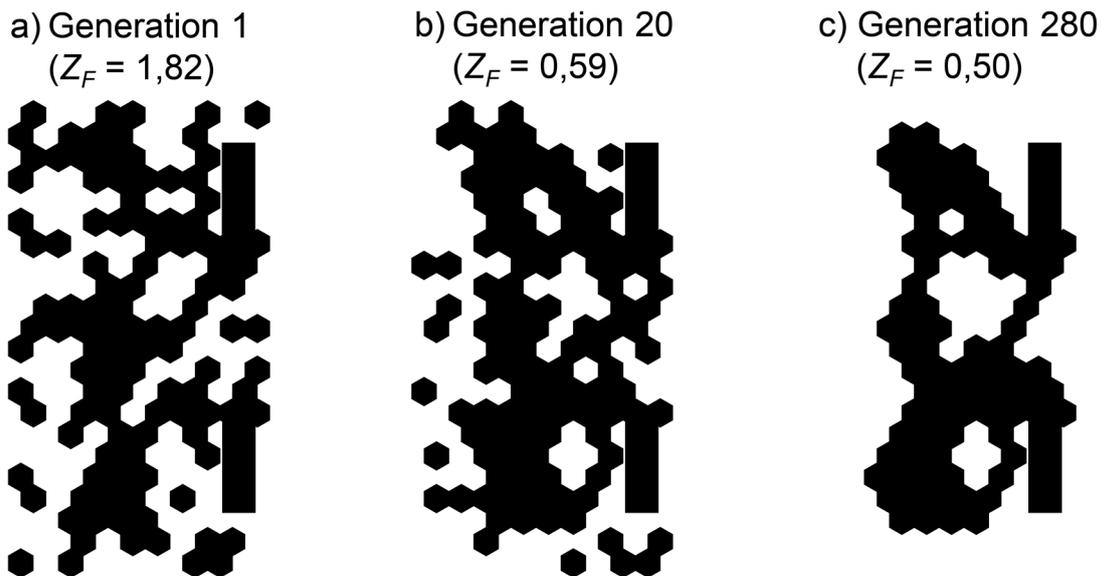


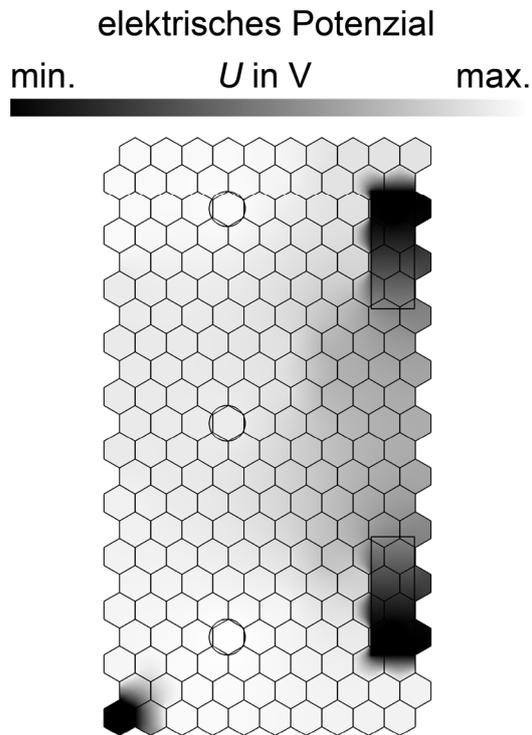
Abbildung 8-3: Entwicklung der Topologie der besten berechneten Individuen anhand von drei verschiedenen Generationen für die Optimierung der Geometrie aus Abbildung 8-2 b) (Gewichtungsfaktoren:  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$ ,  $w_3 = 1/3$ )

Die Ergebnisse für die Zielgrößen des Referenzmodells und der Ergebnistopologie sind in Tabelle 8-1 aufgeführt. Die entsprechenden elektrischen Potenziale der FE-Simulation sind in Abbildung 8-4 visualisiert. Die elektrischen Widerstände der drei Anschlussstellen weisen mit  $0,12 \mu\Omega$  eine wesentlich geringere Standardabweichung als das Referenzmodell ( $3,08 \mu\Omega$ ) auf. Gleichzeitig wurde die Fläche um mehr als die Hälfte reduziert. Der mittlere Widerstand ist demgegenüber mit  $112,24 \mu\Omega$  um etwa 13 % erhöht. Insbesondere die geringe Standardabweichung des Ergebnisses weist darauf hin, dass die Optimierungsmethode erfolgreich auf die Problemstellung übertragen werden konnte. Im weiteren Verlauf wurde mittels Feinoptimierung eine detailliertere Anpassung der Topologie durchgeführt, um das Ergebnis weiter zu verbessern.

Tabelle 8-1: Resultierende Zielgrößen für die elektrische Optimierung der Geometrie aus Abbildung 8-2 b) für das Referenzmodell und das Ergebnis der Optimierung

Modell	$R_1$ in $\mu\Omega$	$R_2$ in $\mu\Omega$	$R_3$ in $\mu\Omega$	$\sigma_R$ in $\mu\Omega$	$\bar{R}$ in $\mu\Omega$	$A_Z$ in $\text{mm}^2$
Referenz	101,66	94,61	100,44	3,08	98,90	3573
Ergebnis	112,42	112,15	112,16	0,12	112,24	1568

a) Referenz



b) Ergebnis

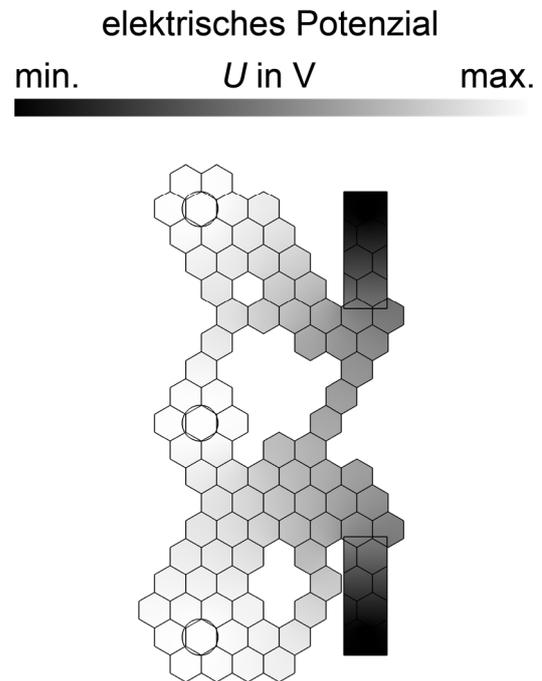


Abbildung 8-4: a) Elektrisches Potenzial des Referenzmodells aus Abbildung 8-2 b) zur Normierung der Zielgrößen; b) elektrisches Potenzial des Ergebnisses der Optimierung aus Abbildung 8-2 b) (Gewichtungsfaktoren:  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$ ,  $w_3 = 1/3$ )

### 8.2.2 Feinoptimierung

Die Feinoptimierung stellt, wie bereits in Abschnitt 7.3.2 beschrieben, eine effiziente Vorgehensweise dar, um das Ergebnis weiter zu verbessern. Hierfür werden einzelne Elemente des Modells manuell dem Optimierungsbereich hinzugefügt. Außerdem besteht die Möglichkeit, an Engstellen die Geometrie durch Pentagone zu verfeinern. In Abbildung 8-5 a) ist das Referenzmodell der Feinoptimierung gezeigt. Der Optimierungsbereich ist in der Abbildung markiert. Weiterhin sind einzelne Elemente zu erkennen, die verfeinert wurden. Die Vorgehensweise zur Auswahl dieser Elemente ist analog zu Abschnitt 7.3.2. Beispielsweise besitzt die Verbindungsstelle 1 zwei Pfade zur Anschlussstelle, sodass diese beiden Pfade ausgewählt wurden, um einen Pfad gegebenenfalls mittels Verbreiterung zu eliminieren.

Die Optimierungsmethode wurde analog zu Abschnitt 7.3.2, mit den Gewichtungsfaktoren  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$  und  $w_3 = 1/3$ , durchgeführt. Die resultierende Geometrie mit dem elektrischen Potenzial des Ergebnisses dieser Optimierung ist in Abbildung

8-5 b) dargestellt. Die redundante Verbindung wurde durch den Algorithmus entfernt. Die Ergebnisse für die Zielgrößen können der Tabelle 8-2 entnommen werden. In Bezug auf das Ergebnis der grundlegenden Optimierung wurde eine Reduzierung der Standardabweichung der Widerstände und der Fläche erreicht. Der mittlere Widerstand wurde demgegenüber um 5,6 % vergrößert.

Tabelle 8-2: Resultierende Zielgrößen für die elektrische Optimierung der Geometrie aus Abbildung 8-4 b) für das Referenzmodell und das Ergebnis der Feinoptimierung

Modell	$R_1$ in $\mu\Omega$	$R_2$ in $\mu\Omega$	$R_3$ in $\mu\Omega$	$\sigma_R$ in $\mu\Omega$	$\bar{R}$ in $\mu\Omega$	$A_Z$ in $\text{mm}^2$
Referenz	104,53	102,93	107,80	2,02	105,09	1638
Ergebnis	118,53	118,59	118,54	0,03	118,55	1374

a) Referenz

b) Ergebnis

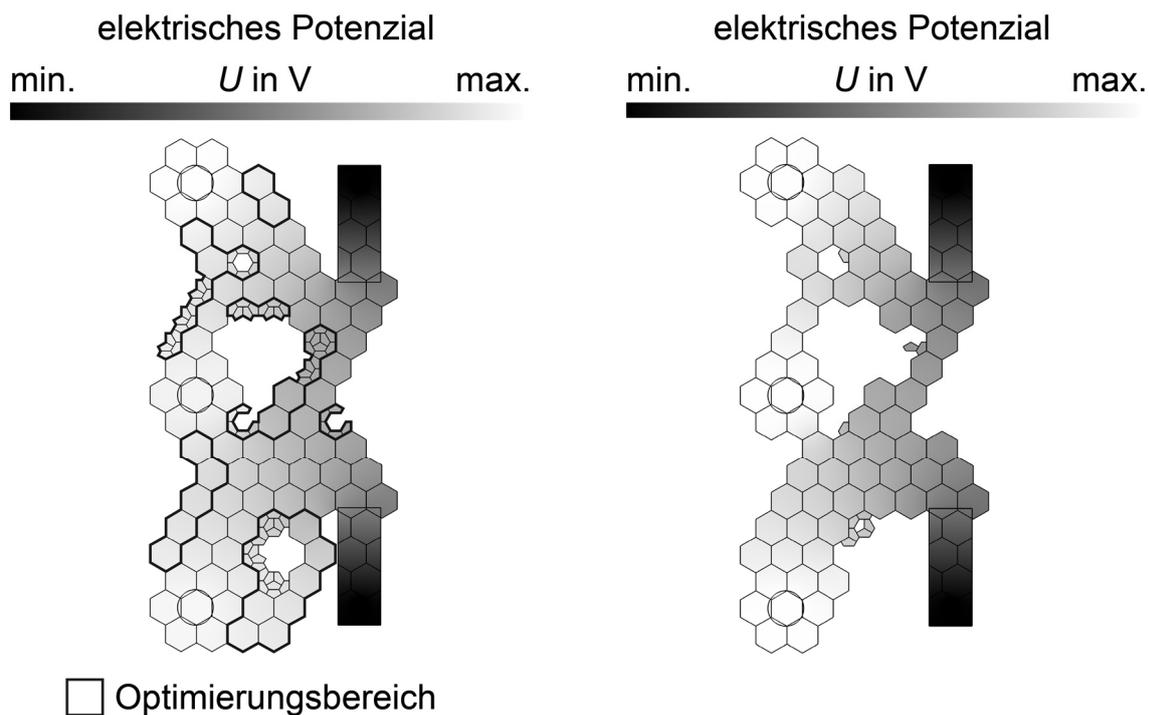


Abbildung 8-5: a) Elektrisches Potenzial des Referenzmodells für die Feinoptimierung der Geometrie aus Abbildung 8-4 b); b) elektrisches Potenzial des Ergebnisses der Optimierung (Gewichtungsfaktoren:  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$ ,  $w_3 = 1/3$ )

### 8.2.3 Ergebnis der Optimierung

Um das Ergebnis für den optimierten Zellverbinder zu erhalten, muss die Topologie aus Abbildung 8-5 b) gespiegelt und auf diese Weise zu einem vollständigen Zellverbinder zusammengefügt werden. Um das Ergebnis zu verifizieren, wurde für diese Topologie erneut eine elektrische FE-Simulation durchgeführt und es wurden die Zielgrößen berechnet. Basierend auf einer Glättung der Ränder der Topologie wurde analog zu Abschnitt 7.3.3 aus dem Ergebnis der Feinoptimierung eine fertigbare Topologie abgeleitet. Für diese wurden ebenfalls mittels FE-Simulation die Zielgrößen berechnet. Die Ergebnisse der Zielgrößen für beide Topologien sind in Tabelle 8-3 aufgeführt, während die elektrischen Potenziale der Abbildung 8-6 entnommen werden können. Es ist zu beachten, dass aufgrund der symmetrischen Ausführung der Topologie die gegenüberliegenden Verbindungsstellen jeweils identische Widerstände aufweisen.

Aufgrund der Randglättung der Topologie konnten der mittlere Widerstand und die Fläche in Bezug auf das Ergebnis der Feinoptimierung leicht reduziert werden. Demgegenüber weist die Standardabweichung der Widerstände einen leicht erhöhten Wert auf. Der Zielfunktionswert für die fertigbare Geometrie ist mit 0,57 um 0,01 kleiner als der Wert für das Ergebnis der Feinoptimierung. In Abbildung 8-6 ist zusätzlich die Knicklinie enthalten, welche als Referenz für die Position der Anschlussstellen dient.

*Tabelle 8-3: Resultierende Zielgrößen für die zusammengefügte Ergebnistopologie der Feinoptimierung aus Abbildung 8-5 b) und für die daraus abgeleitete herstellbare Topologie; aufgrund der Symmetrie weisen die gegenüberliegenden Verbindungsstellen jeweils identische Widerstände auf*

<b>Modell</b>	$R_{1,4}$ in $\mu\Omega$	$R_{2,5}$ in $\mu\Omega$	$R_{3,6}$ in $\mu\Omega$	$\sigma_R$ in $\mu\Omega$	$\bar{R}$ in $\mu\Omega$	$A_Z$ in $\text{mm}^2$
Ergebnis der Optimierung	94,60	94,56	94,49	0,05	94,55	2712
fertigbare Geometrie	92,39	92,27	92,24	0,07	92,30	2673

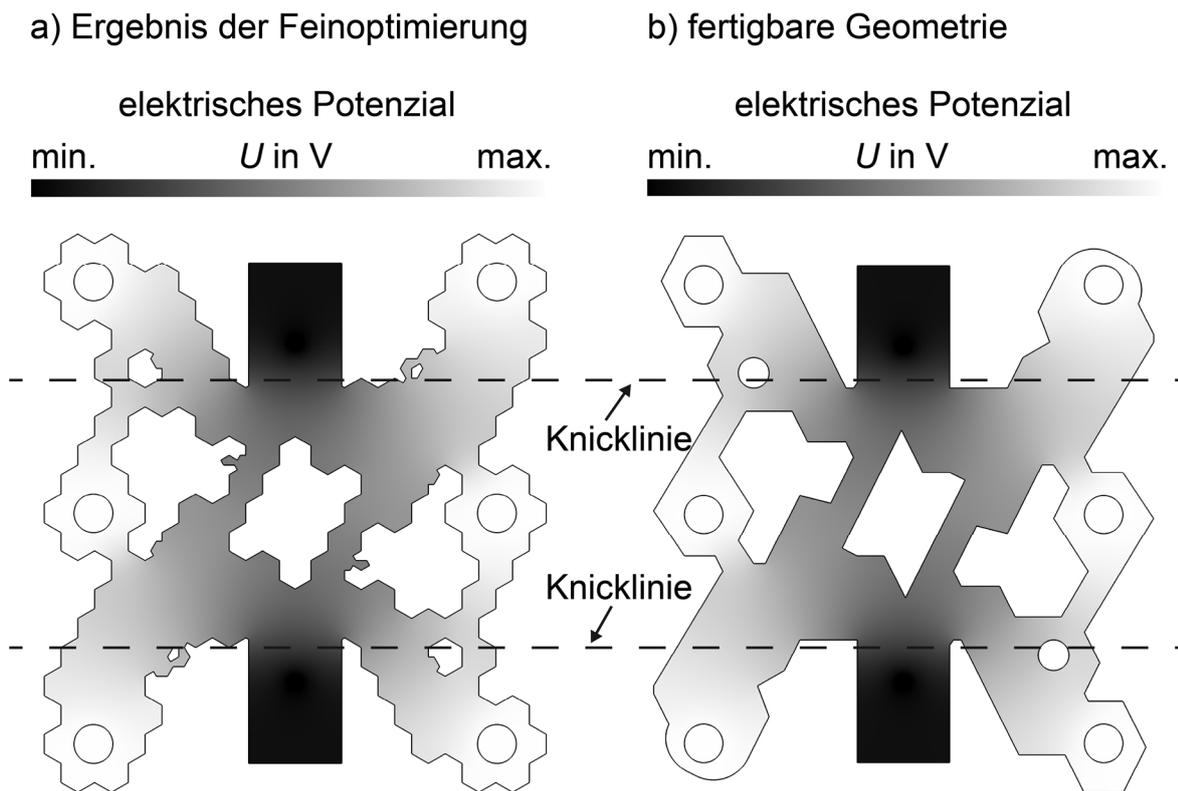


Abbildung 8-6: a) Elektrisches Potenzial des Ergebnisses der Feinoptimierung nach Spiegelung und Zusammenfügen zum finalen Zellverbinder; b) elektrisches Potenzial der aus dem Ergebnis abgeleiteten herstellbaren Topologie

### 8.3 Laserstrahlschweißen des Zellverbunds

Um den Zellverbund herzustellen, wurde der in Abbildung 8-6 b) veranschaulichte Zellverbinder mittels Wasserstrahlschneiden gefertigt. Als Werkstoff wurde Kupfer (Cu-DHP/CW024A) ausgewählt und die Dicke des Bauteils betrug 1,0 mm. Um den optimierten Zellverbinder wie in Abbildung 2-5 assemblieren zu können, wurde der Zellhalter konstruktiv angepasst und mittels additiver Verfahren erzeugt. Außerdem wurden die Zellverbinder an den Knicklinien um 90° gebogen. Die Ableiterbleche aus vernickeltem Stahl wurden mittels Laserstrahlung an die Zellverbinder geschweißt, bevor die drei Komponenten Batteriezellen, Zellverbinder und Zellhalter zu einem Zellverbund montiert wurden.

Die elektrische Kontaktierung von Batteriezelle und Ableiter wurde mit den in Abschnitt 5.3 ermittelten Prozessparametern des Spike-Pulses sowie unter Anwendung der in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Spannvorrichtung durchgeführt. Die Anzahl der

notwendigen Schweißpunkte bei einem Kreisdurchmesser von 5 mm wurde in Kapitel 5 hergeleitet und beträgt  $N_P = 20$ .

In Abbildung 8-7 ist der kontaktierte Zellverbund mit optimierten Zellverbindern dargestellt. Insgesamt wurden zwei parallele Stränge mit jeweils 12 Zellen mittels vier Zellverbindern verbunden.

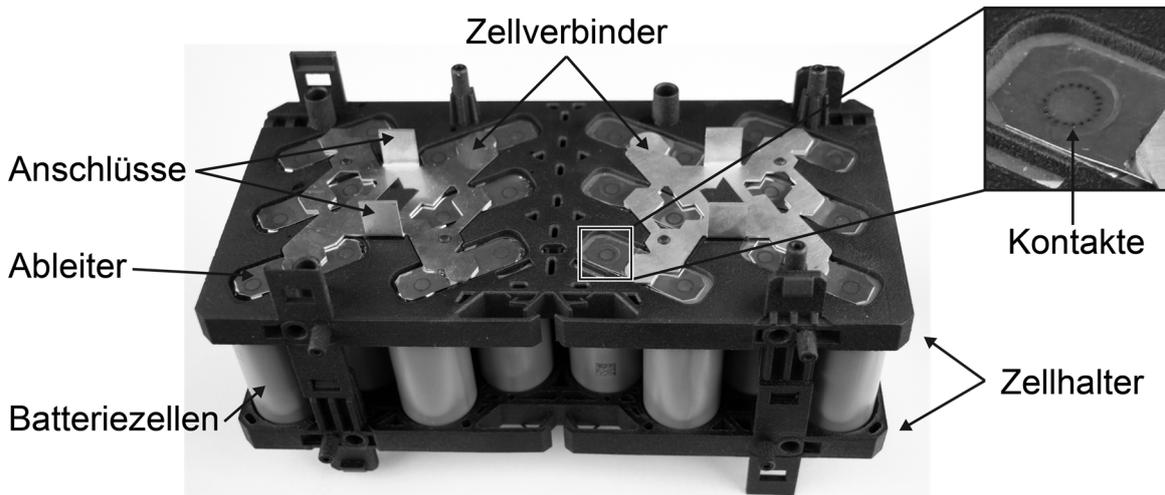


Abbildung 8-7: Mittels gepulster Laserstrahlung kontaktierter Zellverbund mit optimierten Zellverbindern; Schweißparameter: Nummer 1, Tabelle 5-3

## 8.4 Technologische Bewertung

Im Rahmen der technologischen Bewertung werden der konventionelle und der optimierte Zellverbinder einander gegenübergestellt. Die Anforderungen an das elektrische Verbindungselement von Lithium-Ionen-Zellen wurden in Abschnitt 2.2.4 ausführlich beschrieben und bestehen aus drei Kriterien: Zunächst sollte das Bauteil einen möglichst kleinen elektrischen Widerstand aufweisen. Weiterhin sollte für alle Zellen der gleiche Widerstand vorliegen. Zuletzt sollte aufgrund von Werkstoffesparungen und Leichtbauaspekten die Masse des Bauteils möglichst gering sein. In Tabelle 8-4 sind diese Kriterien für beide Zellverbinder aufgeführt. Hierfür wurde mit den geometrischen Daten des konventionellen Zellverbinders eine FE-Simulation durchgeführt, um das elektrische Potenzial zu berechnen. Die Ergebnisse für beide Bauteile sind in Abbildung 8-8 gezeigt. Um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden die Anschlussstellen identisch modelliert, wobei die Position für beide Bauteile  $e = 3,5$  mm von der Knicklinie entfernt lag.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Standardabweichung der sechs Widerstände durch die simulationsgestützte Optimierung um 98,9 % reduziert werden konnte. Die in Kapitel 7 vorgestellte Methode zur automatisierten Auslegung der Topologie ist demnach ein geeignetes Werkzeug, um im Vergleich zu einer manuellen Auslegung wesentlich bessere Werte in Bezug auf die Abweichung der Widerstände zu erreichen. Es ist davon auszugehen, dass eine Angleichung der Widerstände positive Auswirkungen auf die Lebensdauer der verwendeten Batteriezellen hat. Gleichzeitig konnte auch eine Verbesserung des mittleren Widerstands um 11,7 % festgestellt werden. Dies führt zu geringeren thermischen Verlusten der innerhalb des Batteriesystems gespeicherten Energie und somit zu einer Erhöhung der Gesamteffizienz. Weiterhin wurde die Masse der beiden Bauteile betrachtet. Es konnte durch die optimierte Geometrie eine Reduzierung der Bauteilmasse um 11,1 % erreicht werden. Für den *Energy Neighbor* als beispielhaften Energiespeicher würde dies eine Masseeinsparung von etwa 10 kg bedeuten.

Zusammenfassend konnte durch die Optimierungsmethode ein Zellverbinder entwickelt werden, der in allen drei auslegungsrelevanten Kriterien dem konventionellen Zellverbinder überlegen ist. Demnach kann die vorgestellte Methode als geeignet für die universelle Auslegung der Topologie von Zellverbindern für Energiespeichersysteme betrachtet werden.

*Tabelle 8-4: Vergleich der Zielfunktionswerte für die Standardabweichung, den mittleren Widerstand und die Fläche zwischen dem konventionellen Zellverbinder und dem optimierten Zellverbinder*

<b>Modell</b>	$\sigma_R$ in $\mu\Omega$	$\bar{R}$ in $\mu\Omega$	$A_Z$ in $\text{mm}^2$	$m$ in g
konventioneller Zellverbinder	6,33	104,5	3006	26,87
optimierter Zellverbinder	0,07	92,30	2673	23,90

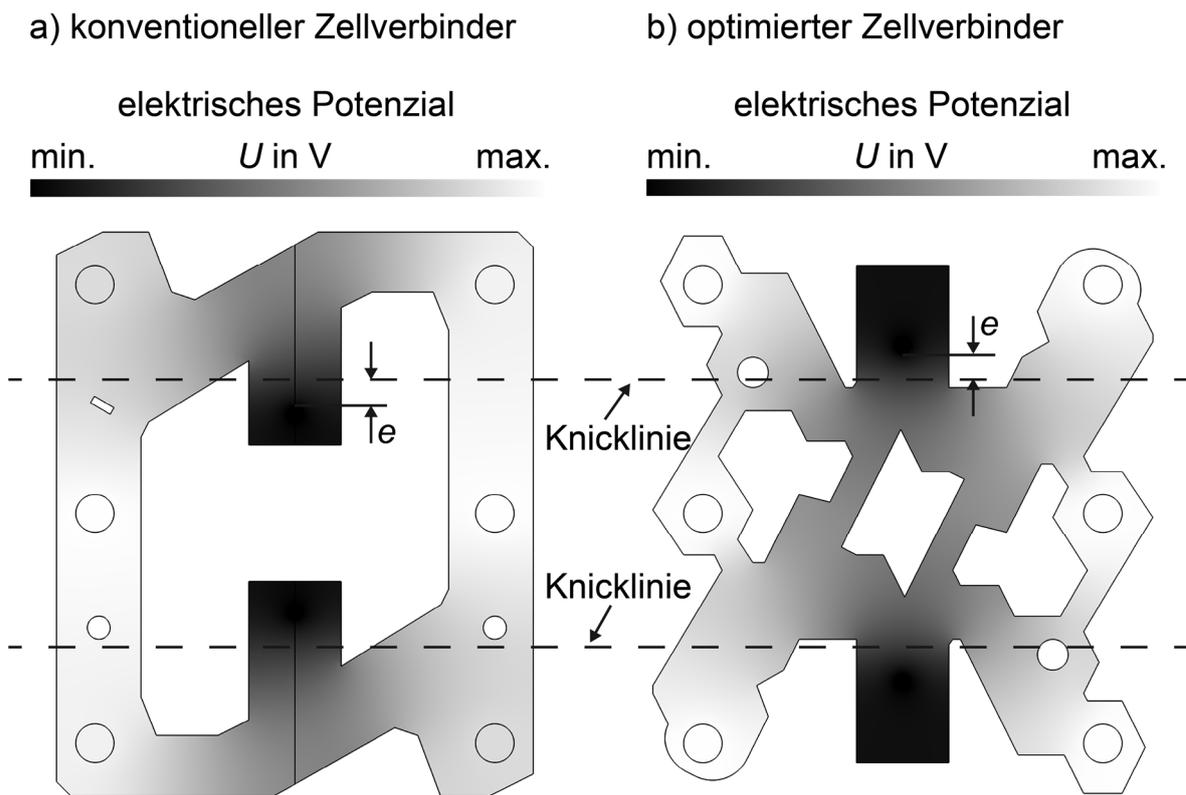


Abbildung 8-8: a) Elektrisches Potenzial des konventionellen Zellverbinders; b) elektrisches Potenzial des aus dem Optimierungsergebnis hergeleiteten Zellverbinders; Position der Anschlussstellen:  $e = 3,5$  mm von der Knicklinie entfernt

## 8.5 Wirtschaftliche Bewertung

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurde der entwickelte Laserstrahlschweißprozess betrachtet und dem konventionellen Widerstandspunktschweißen im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Betrachtung gegenübergestellt. Dazu wurden die Fertigungskosten für beide Technologien nach der *VDI-Richtlinie 3258 A* berechnet, wobei die Maschinenstundensätze, die Lohnkosten, die Fertigungszeiten bzw. die Taktzeiten sowie die jährliche Stückzahl berücksichtigt wurden. Die der Wirtschaftlichkeitsbewertung zugrunde liegenden Daten sind in Anhang A6 aufgeführt. Die Berechnung der Kosten des Widerstandspunktschweißens wurde anhand der Schweißanlage *AMADA MIYACHI PECO AWS3* durchgeführt. Der Maschinenstundensatz beträgt bei dieser Systemtechnik 3,09 €/h. Für das Laserstrahlschweißen wurde ein Laserbearbeitungszentrum, welches aus einem *TRUMPF TruDisk 2000* mit Lichtleitkabel, einer *TRUMPF PFO 33-2* sowie einem Wasser-Luft-Kühler besteht, ausgewählt. Für das Laserstrahlschweißen ergibt sich aufgrund der hohen Investitionskosten von 172.000 € ein Maschinenstundensatz von 13,07 €/h. Allerdings

weist das Laserbearbeitungszentrum eine wesentlich höhere Produktivität von 80 Zellverbunden pro Stunde auf. Mittels Widerstandspunktschweißen können nur 23 Zellverbunde pro Stunde gefertigt werden, was durch die höhere Prozesszeit aufgrund des pneumatischen Auf- und Abfahrens des Schweißkopfes begründet ist.

In Abbildung 8-9 sind die berechneten jährlichen Fügekosten in Abhängigkeit von den gefertigten Zellverbunden pro Jahr für beide Technologien visualisiert. Der Break-even wird bei einer jährlichen Stückzahl von 87.000 Zellverbunden erreicht. Ab einer Stückzahl von 70.449 wird eine zweite Widerstandspunktschweißanlage benötigt, wohingegen eine zweite Laserstrahlquelle erst ab einer jährlichen Stückzahl von 246.414 notwendig ist.

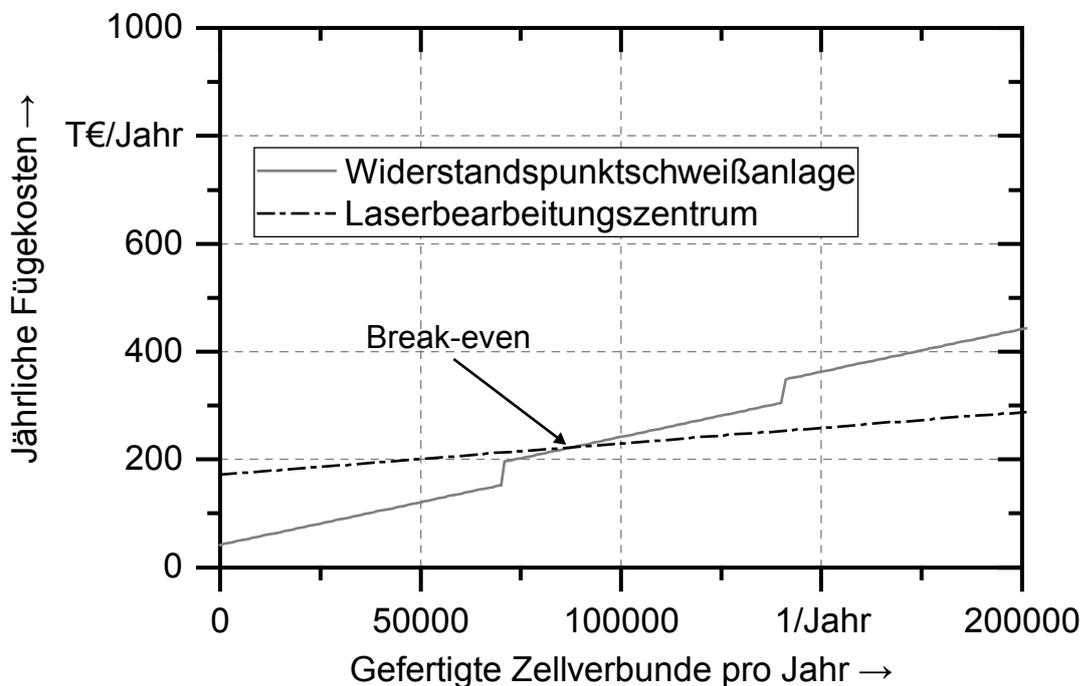


Abbildung 8-9: Jährliche Fügekosten in Abhängigkeit der gefertigten Zellverbunde pro Jahr für die Widerstandspunktschweißanlage und das Laserbearbeitungszentrum; Grundlagen der Berechnung in Anhang A6; Break-even bei 87.000 Stück / Jahr

## 8.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Anwendung der Methode zur Auslegung des Zellverbinders sowie der Einsatz des gepulsten Laserstrahlschweißprozesses zur Herstellung eines Zellverbunds beschrieben. Zunächst wurde die in Kapitel 7 vorgestellte Methode zur Optimierung der Zellverbindertopologie entsprechend den Randbedingungen des Zellverbunds angepasst und eine simulationsgestützte Optimierung der Topologie durchgeführt. Das Ergebnis dieser Auslegung wurde gefertigt und zusammen mit modifizierten Zellhaltern und Lithium-Ionen-Zellen zu einem Zellverbund assembliert. Der in Abschnitt 5.3 vorgestellte Spike-Puls-Schweißprozess wurde angewendet, um die Ableiterbleche mit den Batteriezellen zu verbinden. Hierbei wurden entsprechend der Auslegung der Anbindungsfläche gemäß Abschnitt 5.4 20 Schweißpunkte pro Zellpol appliziert.

Anhand einer technologischen Bewertung und eines Vergleichs zwischen dem konventionellen und dem optimierten Zellverbinder konnte nachgewiesen werden, dass alle drei Kriterien für die Verbindung der Batteriezellen (niedrige Widerstände, gleiche Widerstände und geringe Masse) durch die Auslegungsmethode verbessert wurden. Insbesondere die Standardabweichung der Widerstände konnte um 98,9 % reduziert werden.

Die Wirtschaftlichkeit des Laserstrahlschweißprozesses wurde bewertet, indem das Kosten-Nutzen-Verhältnis mit einer Widerstandspunktanlage verglichen wurde. Die Berechnung ergab, dass es ab einer jährlichen Stückzahl von 87.000 Zellverbunden wirtschaftlicher ist, den Kontaktierungsprozess mittels Laserstrahlung durchzuführen.



## 9 Schlussbetrachtung

### 9.1 Zusammenfassung

Die elektrische Verbindung von Lithium-Ionen-Zellen zur Herstellung von Energiespeichern hat einen entscheidenden Einfluss auf die Funktionalität und die Wirtschaftlichkeit des Speichersystems. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde die Entwicklung eines gepulsten Laserstrahlschweißprozesses beschrieben, mit welchem zylindrische Batteriezellen prozesssicher und mit einem kleinen Wärmeeintrag kontaktiert werden können.

Für den Schweißprozess wurde das Spike-Puls-Verfahren angewendet. Diese Pulsstrategie zeichnet sich durch einen kurzen Leistungspeak aus, mit welchem die Fügeverbindung hergestellt wird. Die innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben aufgezeigt, dass die Einschweißtiefe maßgeblich vom Energiegehalt dieses Peaks abhängt. Es konnten Prozessparameter identifiziert werden, die für die Kontaktierung der Zellen geeignet sind.

Da die gepulste Schweißstrategie einzelne Schweißpunkte appliziert, ist die minimal notwendige Anzahl an Kontaktpunkten ein wichtiges Kriterium hinsichtlich der Prozessauslegung. Mit steigender Anzahl an Schweißpunkten nimmt nicht nur die Prozesszeit, sondern auch der prozessbedingte Wärmeeintrag in die Zelle zu. Innerhalb dieser Arbeit wurden die Anforderungen der Anbindungsfläche zwischen der Zelle und dem Ableiterblech hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit, der mechanischen Scherzugfestigkeit und der Vibrationsbeständigkeit betrachtet. Für alle drei Eigenschaften konnten Kriterien für die Anforderungen identifiziert und eine minimal notwendige Anbindungsfläche abgeleitet werden.

Der durch den Schweißprozess induzierte und maximal erträgliche Wärmeeintrag stellt eine entscheidende Prozessrandbedingung zur Vermeidung von Beschädigungen der Zellen dar. Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchungen an funktionsfähigen Zellen haben ergeben, dass ein erhöhter Wärmeeintrag während des Schweißprozesses zu einer Reduzierung der Kapazität der Zelle führt. Aus diesem Grund wurde der prozessbedingte Temperaturanstieg innerhalb der Batteriezellen untersucht und eine Strategie zur Minimierung des Wärmeeintrags vorgeschlagen. Es konnte aufgezeigt werden, dass bei der gleichzeitigen Kontaktierung mehrerer Zellen eine signifikante Reduzierung des maximalen Temperaturanstiegs erreicht werden kann, wenn die Zellen nicht nacheinander verschweißt, sondern die einzelnen Schweißpunkte sequenziell über die Zellen verteilt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit war eine Methode zur simulationsgestützten Auslegung des Zellverbinders hinsichtlich eines kleinen Gesamtwiderstands, einer geringen Abweichung der Widerstände der verschiedenen Zellen sowie einer kleinen Bauteilmasse. Durch die Kombination eines Genetischen Algorithmus mit einem elektrischen FE-Simulationsmodell konnte eine verbesserte Topologie des Zellverbinders ermittelt werden.

Die Methode zur Topologieoptimierung wurde für einen Zellverbund, bestehend aus zwölf zylindrischen Zellen, angewendet und das resultierende Bauteil wurde unter Anwendung des entwickelten Schweißprozesses mit den Zellen verbunden. Eine technologische Bewertung ergab, dass der optimierte Zellverbinder gegenüber einem konventionell ausgelegten Bauteil in allen drei betrachteten Kriterien überlegen war. Abschließend konnte mit einer Wirtschaftlichkeitsbewertung aufgezeigt werden, dass der Fertigungsprozess mittels Laserstrahlschweißen gegenüber dem Widerstandspunktschweißen in der Serienfertigung ab einer gewissen Anzahl von Zellverbunden pro Jahr wirtschaftlich zu bevorzugen ist.

### **9.2 Ausblick**

In der vorliegenden Arbeit wurde das Potenzial der gepulsten Laserstrahlung für die Kontaktierung von zylindrischen Zellen aufgezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse können in nachfolgenden Forschungsarbeiten aufgegriffen und fortgeführt werden.

Um das Laserstrahlschweißen als Fügeverfahren in der Herstellung von Energiespeichern zu etablieren, bedarf es produktseitig Entwicklungsarbeiten mit Blick auf eine fertigungsgerechte Konstruktion des Zellverbunds. In diesem Zusammenhang ist eine Funktionsintegration von Spannelementen in den Zellhalter denkbar, um eine aufwendige Spannvorrichtung zu substituieren.

Aktuelle Entwicklungen von Laserstrahlquellen im Bereich der sichtbaren Strahlung mit Ausgangsleistungen von mehr als 1 kW bieten das Potenzial, den gepulsten Schweißprozess auf Kupferwerkstoffe zu übertragen. Dadurch wäre eine direkte Kontaktierung der Zellen an den Zellverbinder möglich.

Ferner kann die Methode zur simulationsgestützten Auslegung des Zellverbinders hinsichtlich einer Schnittstelle zur automatisierten Modellübergabe zwischen grundlegender Optimierung und Feinoptimierung weiterentwickelt werden.

Neben den weiterführenden Forschungsaktivitäten kann eine industrielle Umsetzung des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Kontaktierungsprozesses und der Optimierungsmethode für die Produktion von Energiespeichersystemen erfolgen.



## 10 Literaturverzeichnis

### AULIG & OLHOFFER 2016

Aulig, N.; Olhofer, M.: Evolutionary computation for topology optimization of mechanical structures: An overview of representations. (Hrsg.): 2016 IEEE Congress on Evolutionary, Vancouver, Canada, 24-29.07.2016 (2016), S. 1948-1955.

### BAKER 1985

Baker, J. E.: Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms. Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc. 1985, S. 101-111. ISBN: 0-8058-0426-9.

### BALAMURUGAN ET AL. 2011

Balamurugan, R.; Ramakrishnan, C. V.; Swaminathan, N.: A two phase approach based on skeleton convergence and geometric variables for topology optimization using genetic algorithm. Structural and Multidisciplinary Optimization 43 (2011) 3, S. 381-404.

### BITTNER 2013

Bittner, U.: Strukturakustische Optimierung von Axialkolbeneinheiten. Modellbildung, Validierung und Topologieoptimierung. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2013. ISBN: 978-3-86644-938-1. (Schriftenreihe des Instituts für Technische Mechanik 17).

### BRAND ET AL. 2015

Brand, M. J.; Schmidt, P. A.; Zaeh, M. F.; Jossen, A.: Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances. In: Journal of Energy Storage 1 (2015) o. Nr., S. 7-14.

### BRAND ET AL. 2016

Brand, M. J.; Hofmann, M. H.; Steinhardt, M.; Schuster, S. F.; Jossen, A.: Current distribution within parallel-connected battery cells. In: Journal of Power Sources 334 (2016) o. Nr., S. 202-212.

BRITTEN ET AL. 2015

Britten, S. W.; Wein, S.; Olowinsky, A.; Gillner, A.: Laser Impulse Metal Bonding with Temporal Power Modulation. PCIM Europe 2015. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, 19-21.05.2015 (2015) o. Nr., S. 1320-1326.

BRITTEN 2016

Britten, S. W.: Closing the Gap between Electronics and High Power Connectors. LIMBO. In: Laser Technik Journal 13 (2016) 2, S. 53-55.

BUCHFINK 2008

Buchfink, G.: Werkzeug Laser. Ein Lichtstrahl erobert die industrielle Fertigung. 2. Auflage., Würzburg: Vogel, 2008. ISBN: 978-3-83433-052-9.

BURDA 2015

Burda, P.: Verfahren zur Entwicklung und Auslegung von Energiespeichersystemen für Elektro kraftfahrzeuge. 1. Auflage. München: Verl. Dr. Hut, 2015. ISBN: 978-3-84391-971-5.

CAPPELLO & MANCUSO 2003

Cappello, F.; Mancuso, A.: A genetic algorithm for combined topology and shape optimisations. In: Computer-Aided Design 35 (2003) 8, S. 761-769.

CHEN ET AL. 2017

Chen, S.-y.; Shui, X.-f.; Huang, H.: Improved genetic algorithm with two-level approximation using shape sensitivities for truss layout optimization. In: Structural and Multidisciplinary Optimization 55 (2017) 4, S. 1365-1382.

CHOI ET AL. 2012

Choi, S.; Fuhlbrigge, T. A.; Nidamarthi, S.: Vibration analysis in robotic ultrasonic welding for battery assembly. (Hrsg.): 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Seoul, South Korea, 20-24.08.2012 (2012), S. 1-6.

DARWIN 1859

Darwin, C.: On the origin of species by means of natural selection, or, The preservation of favoured races in the struggle for life. London: John Murray 1859.

## DESTATIS 2017

Statistisches Bundesamt (Destatis): EU-Vergleich der Arbeitskosten 2016: Deutschland auf Rang sieben. Pressemitteilung Nr. 125 vom 11.04.2017. URL: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/04/PD17\\_125\\_624.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/04/PD17_125_624.html) (besucht am 28.10.2018)

## DIJKEN ET AL. 2003

Dijken, D. K.; Hoving, W.; De Hosson, J. Th. M.: Laser penetration spike welding: A microlaser welding technique enabling novel product designs and constructions. In: Journal of Laser Applications 15 (2003) 1, S. 11.

## DIN 16742

DIN 16742: Kunststoff-Formteile - Toleranzen und Abnahmebedingungen. Berlin: Beuth 10/2013.

## DIN EN 10139

DIN EN 10139: Kaltband ohne Überzug aus weichen Stählen zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen. Berlin: Beuth 06/2016.

## DIN EN ISO 14273

DIN EN ISO 14273: Widerstandsschweißen - Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen - Probenmaße und Verfahren für die Scherzugprüfung an Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln. Berlin: Beuth 11/2016.

## DWORAK 2013

Dworak, J.: The effect of laser beam pulse shape on the process of pulsed YAG laser welding. In: Welding International 28 (2013) 7, S. 501-509.

## EBERT ET AL. 2017

Ebert F.; Sextl, G.; Lienkamp, M.: Influence of dynamic mechanical stress on lithium-ion-battery aging. In: Bayern Innovativ GmbH (Hrsg.): 6th Conference on Future Automotive Technology. Fuerstenfeldbruck, Germany, 09.-10.05.2017 2017, S. 1-5.

## EICHLER &amp; EICHLER 2010

Eichler, J.; Eichler, H.-J.: Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen. 7 Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. ISBN: 978-3-64210-462-6.

### FAHLBUSCH 2015

Fahlbusch, E.: Batterien als Energiespeicher. Beispiele, Strategien, Lösungen. 1. Auflage. Berlin: Beuth, 2015. ISBN: 978-3-41024-478-3.

### GERDES ET AL. 2004

Gerdes, I.; Klawonn, F.; Kruse, R.: Evolutionäre Algorithmen. Genetische Algorithmen : Strategien und Optimierungsverfahren: Beispielanwendungen. Wiesbaden: Vieweg, 2004. ISBN: 978-3-52805-570-7.

### GOGOANA ET AL. 2014

Gogoana, R.; Pinson, M. B.; Bazant, M. Z.; Sarma, S. E.: Internal resistance matching for parallel-connected lithium-ion cells and impacts on battery pack cycle life. In: Journal of Power Sources 252 (2014) o. Nr., S. 8-13.

### GOLDBERG 2012

Goldberg, D. E.: Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. 30. Auflage. Boston: Addison-Wesley, 2012. ISBN: 0-20115-767-5.

### GONG ET AL. 2015

Gong, X.; Xiong, R.; Mi, C. C.: Study of the Characteristics of Battery Packs in Electric Vehicles with Parallel-Connected Lithium-Ion Battery Cells. In: IEEE Transactions on Industry Applications 51 (2015) 2, S. 1872-1879.

### GRAF & HÜGEL 2009

Graf, T.; Hügel, H.: Laser in der Fertigung. Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. 2., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2009. ISBN: 978-3-83489-570-7.

### HARZHEIM 2014

Harzheim, L.: Strukturoptimierung. Grundlagen und Anwendungen. 2. Auflage. Haan, Rheinl: Europa-Lehrmittel, 2014. ISBN: 978-3-80855-659-7.

### HEINEN ET AL. 2017

Heinen, P.; Haeusler, A.; Mehlmann, B.; Olowinsky, A.: Laser Beam Microwelding of Lithium-ion Battery Cells with Copper Connectors for Electrical Connections in Energy Storage Devices. In: Lasers in Engineering LIE 36 (2017) 1/3, S. 147-167.

**KAMPKER 2014**

Kampker, A.: Elektromobilproduktion. Berlin: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-64242-021-4.

**KARLE 2015**

Karle, A.: Elektromobilität. Grundlagen und Praxis. München: Carl Hanser Verlag, 2015. ISBN: 978-3-44644-339-6.

**KELLENBRINK & HELBER 2014**

Kellenbrink, C.; Helber, S.: Ressourcenbeschränkte Projektplanung für flexible Projekte. Dordrecht: Springer Gabler, 2014. ISBN: 978-3-65802-870-1.

**KOLBE & HELLWIG 2015**

Kolbe, M.; Hellwig, W.: Spanlose Fertigung Stanzen. Präzisionsstanzteile, Hochleistungswerkzeuge, Hochgeschwindigkeitspressen. 11., überarb. u. erw. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. ISBN: 978-3-65809-947-3.

**KORTHAUER 2013**

Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-64230-653-2.

**KRAMER ET AL. 2002**

Kramer, T.; Olowinsky, A. M.; Durand, F.: SHADOW: a new welding technique. In: Sugioka, K. et al. (Hrsg.): High-Power Lasers and Applications. San Jose, California, USA, 20.01.2002: SPIE (2002), S. 545.

**KRAMER 2009**

Kramer, O.: Computational intelligence. Eine Einführung. Dordrecht, New York: Springer, 2009. ISBN: 978-3-54079-738-8.

**KRUSE ET AL. 2015**

Kruse, R.; Borgelt, C.; Braune, C.; Klawonn, F.; Moewes, C.; Steinbrecher, M.: Computational Intelligence. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. ISBN: 978-3-65810-903-5.

**LEE ET AL. 2010**

Lee, S. S.; Kim, T. H.; Hu, S. J.; Cai, W. W.; Abell, J. A.: Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review. (Hrsg.): ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference. Erie, Pennsylvania, USA, October 12–15, 2010, S. 541-549.

LI ET AL. 2016

Li, J.; Zhou, S.; Han, Y.: Advances in Battery Manufacturing, Service, and Management Systems. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc 2016. ISBN: 9781119060741.

LIENKAMP 2016

Lienkamp, M.: Status Elektromobilität 2016 oder wie Tesla nicht gewinnen wird. 22.06.2016, Berlin: ResearchGate, DOI: 10.13140/RG.2.1.4897.2403, 2016.

LUXTRIM GMBH 2018

Luxtrim GmbH: Technische Daten Sony US26650FTC1 3000mAh LiFePO4 Akku. URL: <https://www.akkuteile.de/lifepo-akkus/26650/sony-us26650ftc1-3-2v-3-3v-3000mah-lifepo4-lithium-eisenphosphat-akku/a-100719/> (besucht am 23.09.2018)

MÜLLER ET AL. 2017

Müller, M.; Viernstein, L.; Truong, C. N.; Eiting, A.; Hesse, H. C.; Witzmann, R.; Jossen, A.: Evaluation of grid-level adaptability for stationary battery energy storage system applications in Europe. In: Journal of Energy Storage 9 (2017) o. Nr., S. 1-11

MEHLMANN ET AL. 2014A

Mehlmann, B.; Gehlen, E.; Olowinsky, A.; Gillner, A.: Laser Micro Welding for Ribbon Bonding. In: Physics Procedia 56 (2014) o. Nr., S. 776-781.

MEHLMANN ET AL. 2014B

Mehlmann, B.; Olowinsky, A.; Thuilot, M.; Gillner, A.: Spatially Modulated Laser Beam Micro Welding of CuSn6 and Nickel-plated DC04 Steel for Battery Applications. In: Journal of Laser Micro/Nanoengineering 9 (2014) 3, S. 276-281.

MÜHLENBEIN & SCHLIERKAMP - VOOSSEN 1993

Mühlenbein, H.; Schlierkamp-Voosen, D.: Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm I. Continuous Parameter Optimization. In: Evolutionary Computation 1 (1993) 1, S. 25-49.

## NEWNHAM ET AL. 2013

Newnham, R.; Sun, S.; Karner, D.; Francfort, J.: Energy Storage for DC Fast Chargers Development and Demonstration of Operating Protocols for 20-kWh and 200-kWh Field Sites. Idaho, USA: Idaho National Laboratory, 2013.

## POHLHEIM 2000

Pohlheim, H.: Evolutionäre Algorithmen: Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. ISBN: 978-3-64263-052-1.

## POMPETZKI 2013

Pompetzki, M.: Challenges in Design and Manufacturing of Lithium-Ion Battery Cells for Battery Electrical Vehicles. In: Haus der Technik (Hrsg.): 5. Fachtagung Kraftwerk Batterie. Aachen, 26.-27.02.2013. Aachen: Haus der Technik 2013.

## POPRAWA 2005

Poprawa, R.: Lasertechnik für die Fertigung. Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. ISBN: 978-3-54026-435-4.

## REIF 2010

Reif, K.: Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, 2010. ISBN: 978-3-83489-711-4.

## ROTH &amp; DOUGHTY 2004

Roth, E.; Doughty, D.: Thermal abuse performance of high-power 18650 Li-ion cells. In: Journal of Power Sources 128 (2004) 2, S. 308-318.

## RÖTH ET AL. 2013

Röth, T.; Kampker, A.; Reisgen, U.; Hameyer, K.; Doncker, R. W. de; Stolze, T.; Vetter, A.; Hagedorn, J.; Sauer, Dirk Uwe; Müller, Dirk: Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen. In: Kampker, A. et al. (Hrsg.): Elektromobilität. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, S. 235-334. ISBN: 978-3-64231-985-3.

## SCHMALEN &amp; PLAPPER 2016

Schmalen, P.; Plapper, P.: Evaluation of Laser Braze-welded Dissimilar Al-Cu Joints. In: Physics Procedia 83 (2016) o. Nr., S. 506-514.

SCHMIDT ET AL. 2014

Schmidt, P. A.; Pauleser, T.; Zaeh, M. F.: Optimisation of Weld Seam Configurations Using a Genetic Algorithm. In: Procedia CIRP 25 (2014) o. Nr., S. 393-399.

SCHMIDT ET AL. 2016

Schmidt, P. A.; Schmitz, P.; Zaeh, M. F.: Laser beam welding of electrical contacts for the application in stationary energy storage devices. In: Journal of Laser Applications 28 (2016) 2, S. 695-701.

SCHMIDT 2015

Schmidt, P. A.: Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen: Dissertation. Technische Universität München. München. Forschungsberichte IWB Band 304: Utz, 2015. ISBN: 978-3-83164-519-0.

SCHMITZ ET AL. 2018

Schmitz, P.; Habedank, J. B.; Zaeh, M. F.: Spike laser welding for the electrical connection of cylindrical lithium-ion batteries. In: Journal of Laser Applications 30 (2018) 1, S. 12004-1-12004-7.

SCHMITZ 2016

Schmitz, P.: Comparative Study on Pulsed Laser Welding Strategies for Contacting Lithium-Ion Batteries. In: Advanced Materials Research 1140 (2016) o. Nr., S. 312-319.

SCHRAMM ET AL. 2017

Schramm, D.; Hesse, B.; Hiesgen, G.; Maas, N.; Unterreiner, M.: Fahrzeugtechnik: De Gruyter Oldenbourg, 2017. ISBN: 978-3-48671-620-7.

SCHUTZRECHT US7923144 B2

Schutzrecht US7923144 B2 (12.04.2011). Tesla Motors, Inc. Pr.: US 11/731,574. Kohn, S.; Berdichevsky, G.; Hewett, B. C.: Tunable frangible battery pack system.

SHAWN LEE ET AL. 2013

Shawn Lee, S.; Hyung Kim, T.; Jack Hu, S.; Cai, W. W.; Abell, J. A.; Li, J.: Characterization of Joint Quality in Ultrasonic Welding of Battery Tabs. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering 135 (2013) 2, S. 021004.

## SOLCHENBACH 2014

Solchenbach, T.: Laserbasiertes Schweißlöten von artungleichen Aluminium-Kupfer-Verbindungen: Dissertation. Université du Luxembourg. Luxembourg: Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication, 2014.

## STADLER 2014

Stadler, I.: Energiespeicher. Bedarf, Technologien, Integration. Berlin: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-64237-380-0.

## STEINBERG ET AL. 2014

Steinberg, U.; Klußmann, A.; Liebers, F.: Manuelle Arbeit ohne Schaden. Grundsätze und Gefährungsbeurteilung. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage. Dortmund: Baua, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2014. ISBN: 978-3-88261-009-3.

## WEHRSTEDT ET AL. 2015

Wehrstedt, K.-D.; Döring, I.; Holtappels, K.; Krischok, F.; Michael-Schulz, H.; Oeleker, K.; Oertzen, A. von; Pötzsch, K.-M.; Thomalla, N.: Empfehlungen für die Beförderung gefährlicher Güter - Handbuch über Prüfungen und Kriterien. (Deutsche Übersetzung, 2015) Vereinte Nationen, New York und Genf, 2009. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2015. ISBN: 978-3-98163-807-3.

## WEICKER 2007

Weicker, K.: Evolutionäre Algorithmen. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2007. ISBN: 978-3-83510-219-4.

## WESSELAK ET AL. 2017

Wesselak, V.; Schabbach, T.; Link, T.; Fischer, J.: Handbuch Regenerative Energietechnik. Berlin: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-66253-072-6.

## ZHANG &amp; LI 2009

Zhang, C.; Li, L.: A Coupled Thermal-Mechanical Analysis of Ultrasonic Bonding Mechanism. In: Metallurgical and Materials Transactions B 40 (2009) 2, S. 196-207.

## ZHANG 2017

Zhang, H.: Resistance Welding. Fundamentals and applications. Boca Raton, USA: Taylor & Francis Group LLC, 2017. ISBN: 978-1-13807-524-5.

### ZHOU ET AL. 2000

Zhou, Y.; Gorman, P.; Tan, W.; Ely, K. J.: Weldability of thin sheet metals during small-scale resistance spot welding using an alternating-current power supply. In: Journal of Electronic Materials 29 (2000) 9, S. 1090-1099.

### ZHOU ET AL. 2001

Zhou, Y.; Dong, S. J.; Ely, K. J.: Weldability of thin sheet metals by small-scale resistance spot welding using high-frequency inverter and capacitor-discharge power supplies. In: Journal of Electronic Materials 30 (2001) 8, S. 1012-1020.

### ZITZLER ET AL. 2000

Zitzler, E.; Deb, K.; Thiele, L.: Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results. In: Evolutionary Computation 8 (2000) 2, S. 173-195.

## 11 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren von 2013 bis 2018 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen wurden unter anderem Fragestellungen zum Kontaktieren von Lithium-Ionen-Zellen untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

<b>Studierender</b>	<b>Studienarbeit</b>
Müller, Tobias	Laserstrahlschweißen von Blechen aus vernickeltem Stahl mit modulierter Laserstrahlung zur Kontaktierung in der Batterietechnik ( <i>iwb</i> -Nr.: 2015/27636; Abgabe: Oktober 2015)
Knaier, Johannes	Steigerung der Prozessstabilität beim Kontaktieren von Lithium-Ionen-Zellen mittels Laserstrahlung ( <i>iwb</i> -Nr.: 2015/24381; Abgabe: Oktober 2015)
Bernauer, Christian	Laserstrahlschweißen von vernickeltem Stahl mittels gepulster Laserstrahlung zur Verbindung von Batteriezellen ( <i>iwb</i> -Nr.: 2015/28752; Abgabe: Mai 2016)
Klenk, Benedikt	Methode zur Auslegung des Zellverbinders für Lithium-Ionen-Batterien mittels FEM-Simulation ( <i>iwb</i> -Nr.: 2015/28355; Abgabe: Mai 2016)
Rauch, Sebastian	Prozessstrategien für das Laserstrahlschweißen von Kupfer zur Verbindung von Batteriezellen ( <i>iwb</i> -Nr.: 2015/28753; Abgabe: Mai 2016)
Rüdele, Kai	Optimierte Auslegung von Zellverbindern für Lithium-Ionen-Batterien mittels FEM-Simulation ( <i>iwb</i> -Nr.: 2016/32930; Abgabe: November 2016)

<b>Studierender</b>	<b>Studienarbeit</b>
Heller, Adrian	Schweißen von Kupfer-Stahl-Mischverbindungen mittels gepulster Laserstrahlung zur Verbindung von Batteriezellen ( <i>iwb</i> -Nr.: 2016/32287; Abgabe: Dezember 2016)
Krohn, Andreas	FEM-Simulationsmodell zur Auslegung des Kontaktierprozesses von Lithium-Ionen-Zellen ( <i>iwb</i> -Nr.: 2016/32338; Abgabe: Januar 2017)
Piser, Johannes	Optimierung der elektrischen Verbindung von Lithium-Ionen-Zellen mittels FEM-Simulation ( <i>iwb</i> -Nr.: 2017/34755; Abgabe: Juni 2017)
Bartling, Dominik	Elektrische und mechanische Auslegung laserstrahlgeschweißter Kontakte zur Verbindung von Lithium-Ionen-Zellen ( <i>iwb</i> -Nr.: 2017/36984; Abgabe: November 2017)
Forstenlechner, Paul	Einfluss der prozessbedingten Wärme auf die Zellkapazität bei der Kontaktierung mit Laserstrahlung ( <i>iwb</i> -Nr.: 2017/37621; Abgabe: November 2017)
Piser, Johannes	Design und Herstellung eines optimierten lasergeschweißten Zellverbunds aus Lithium-Ionen-Batterien ( <i>iwb</i> -Nr.: 2017/38720; Abgabe: Januar 2018)

## 12 Anhang

### A1 Schliffbilder der Voruntersuchungen

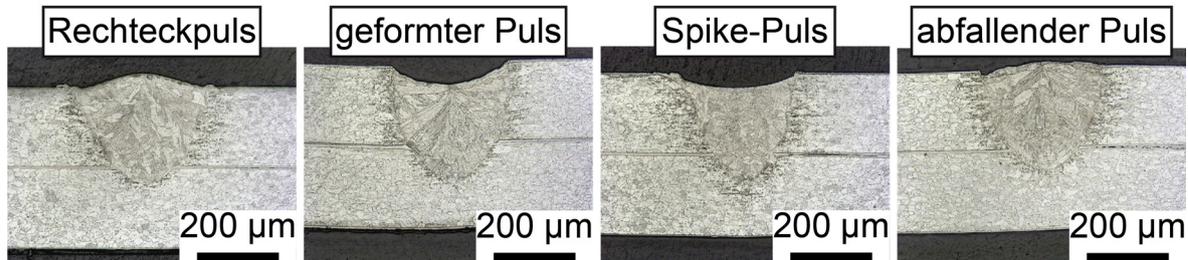


Abbildung 12-1: Schliffbilder der als am besten geeignet identifizierten Parameter innerhalb der Voruntersuchungen aus Abschnitt 5.2

### A2 Vollständiger Versuchsplan der Prozessuntersuchungen

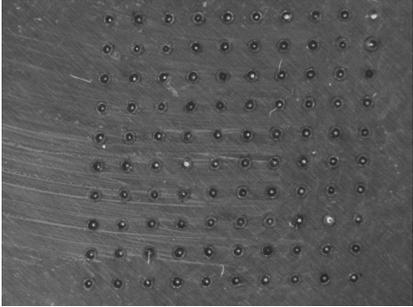
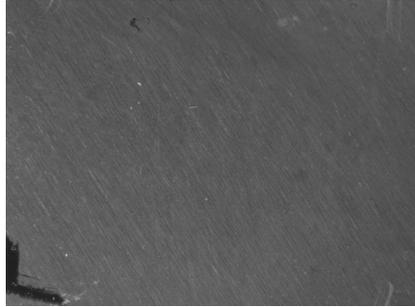
Tabelle 12-1: Vollständiger Versuchsplan der Prozessuntersuchungen aus Abschnitt 5.3

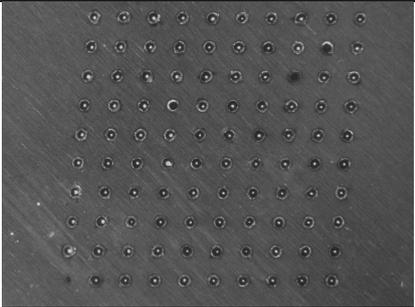
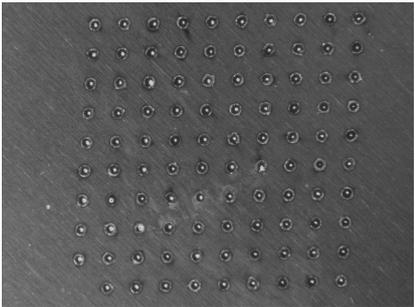
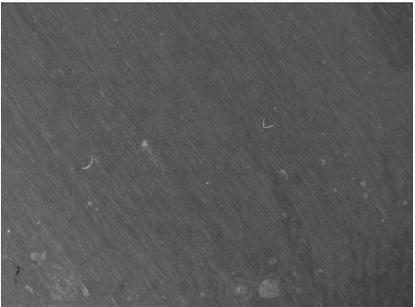
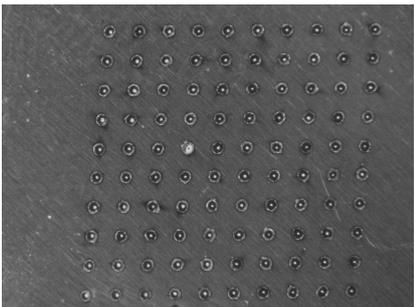
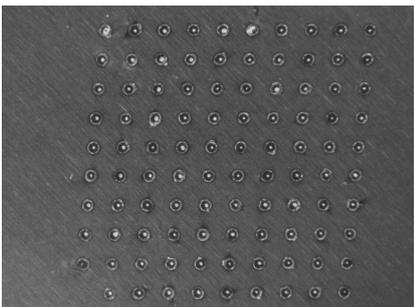
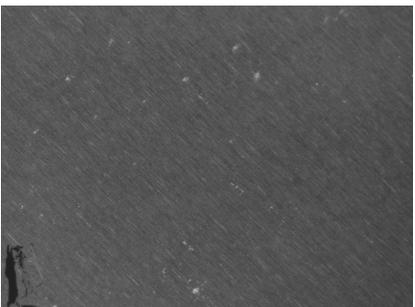
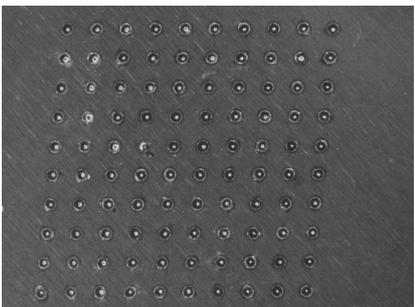
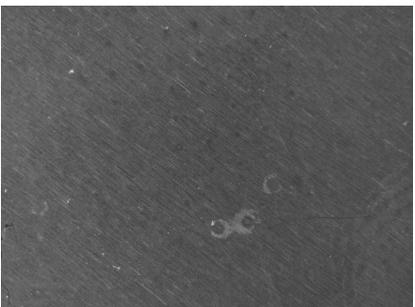
#	$t_p$ ms	$P_1$ W	$t_1$ ms	$P_2$ kW	$t_2$ ms	$P_3$ W	$t_3$ ms
1	10	180	5	1,1	0,2	180	4,8
2	20	180	10	1,1	0,1	90	9,9
3	10	240	5	0,7	0,2	240	4,8
4	10	180	5	1,1	0,2	180	4,8
5	15	180	7,5	1,1	0,1	90	7,4
6	10	180	5	0,7	0,2	90	4,8
7	10	180	5	0,9	0,1	180	4,9
8	15	180	7,5	0,7	0,1	180	7,4
9	10	240	5	0,7	0,1	120	4,9
10	15	210	7,5	0,7	0,1	210	7,4
11	10	180	5	0,9	0,1	180	4,9
12	10	210	5	1,1	0,2	105	4,8
13	15	150	7,5	0,7	0,2	150	7,3
14	15	180	7,5	0,9	0,1	90	7,4
15	20	180	10	0,9	0,1	180	9,9
16	15	150	7,5	0,7	0,1	75	7,4
17	20	180	10	0,7	0,2	90	9,8
18	10	180	5	1,1	0,1	90	4,9
19	10	180	5	0,7	0,1	90	4,9

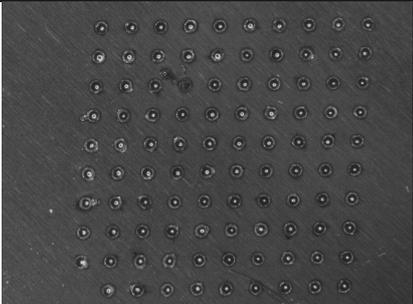
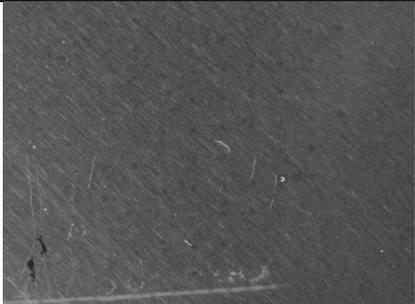
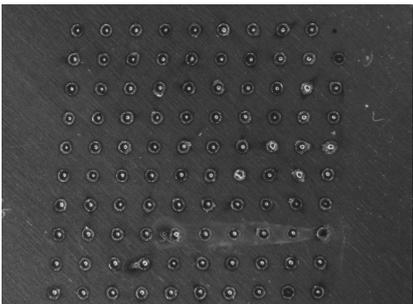
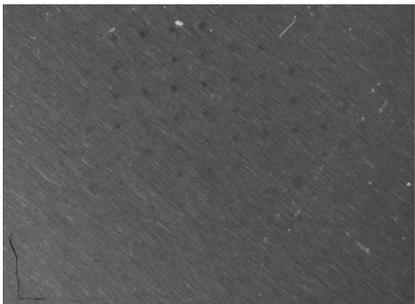
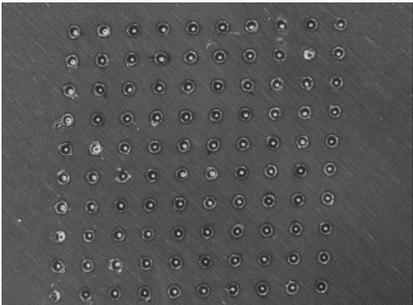
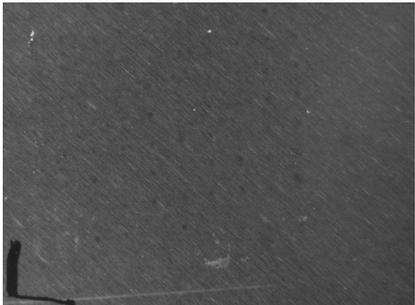
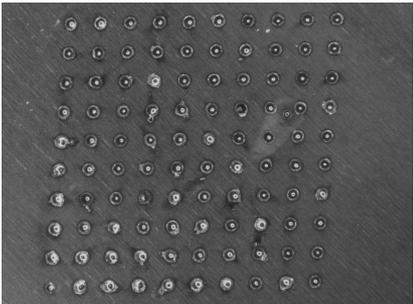
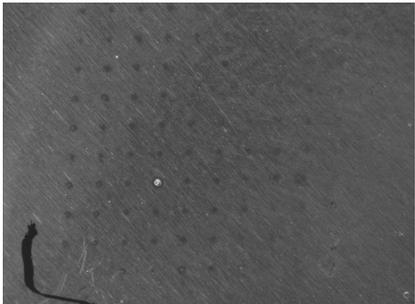
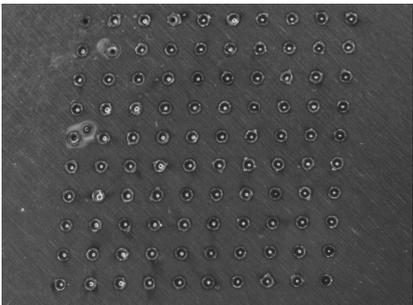
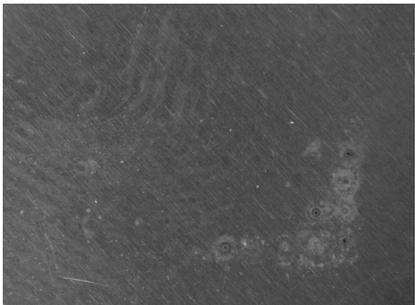
#	$t_P$	$P_1$	$t_1$	$P_2$	$t_2$	$P_3$	$t_3$
-	ms	W	ms	kW	ms	W	ms
20	20	180	10	1,1	0,2	90	9,8
21	5	270	2,5	1,1	0,05	270	2,45
22	5	270	2,5	1,1	0,05	270	2,45
23	5	270	2,5	1,1	0,05	270	2,45
24	5	240	3,75	1,1	0,05	240	1,2
25	5	260	3,75	1,1	0,05	260	1,2
26	10	230	5	1,1	0,1	230	4,9
27	10	230	5	1,1	0,1	230	4,9
28	10	250	5	1,1	0,1	250	4,9
29	10	190	7,5	1,1	0,1	190	2,4
30	10	210	7,5	1,1	0,1	210	2,4
31	15	190	11,25	1,1	0,15	190	3,6
32	15	210	11,25	1,1	0,15	210	3,6
33	15	150	11,25	1,1	0,15	150	3,6
34	15	150	11,25	1,1	0,15	150	3,6
35	15	170	11,25	1,1	0,15	170	3,6
36	15	170	11,25	1,1	0,15	170	3,6
37	15	170	11,25	1,1	0,15	170	3,6

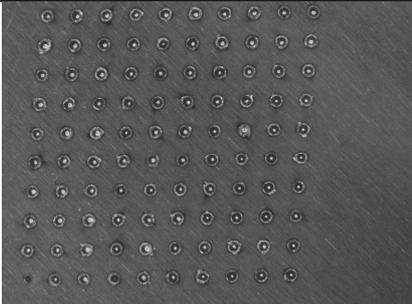
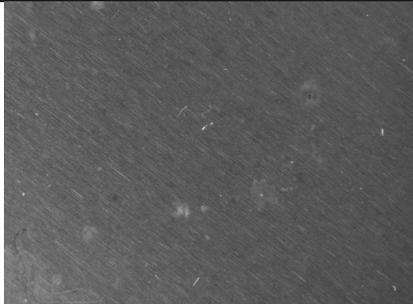
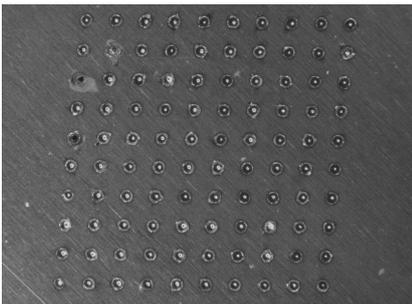
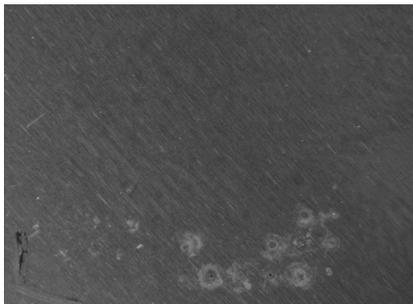
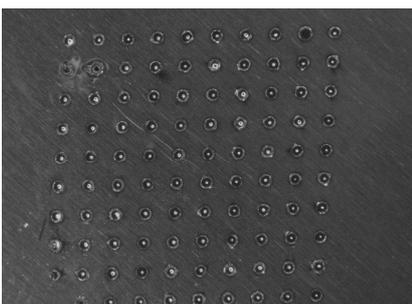
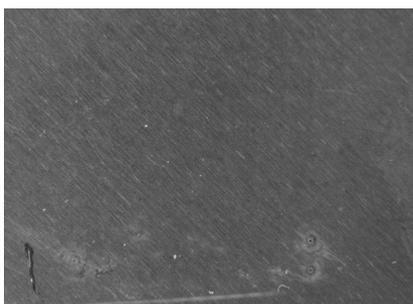
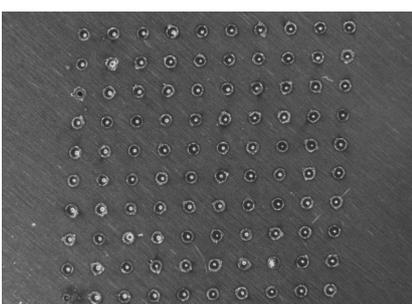
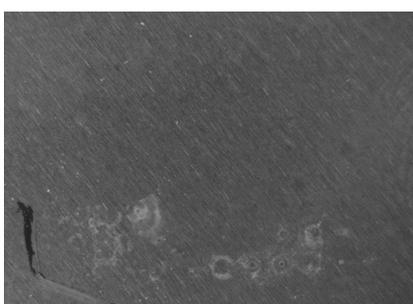
### A3 Mikroskopieaufnahmen zur Bewertung der Reproduzierbarkeit

Tabelle 12-2: Mikroskopieaufnahmen der Versuche zur Bewertung der Reproduzierbarkeit aus Abschnitt 5.3

Prozessparameter	Probennummer	Oberseite	Rückseite
1	1		

Prozess- parameter	Proben- nummer	Oberseite	Rückseite
1	2		
1	3		
1	4		
1	5		
2	1		

Prozess- parameter	Proben- nummer	Oberseite	Rückseite
2	2		
2	3		
2	4		
2	5		
3	1		

Prozess- parameter	Proben- nummer	Oberseite	Rückseite
3	2		
3	3		
3	4		
3	5		

## A4 Schweißvorgang der Widerstandspunktschweißungen

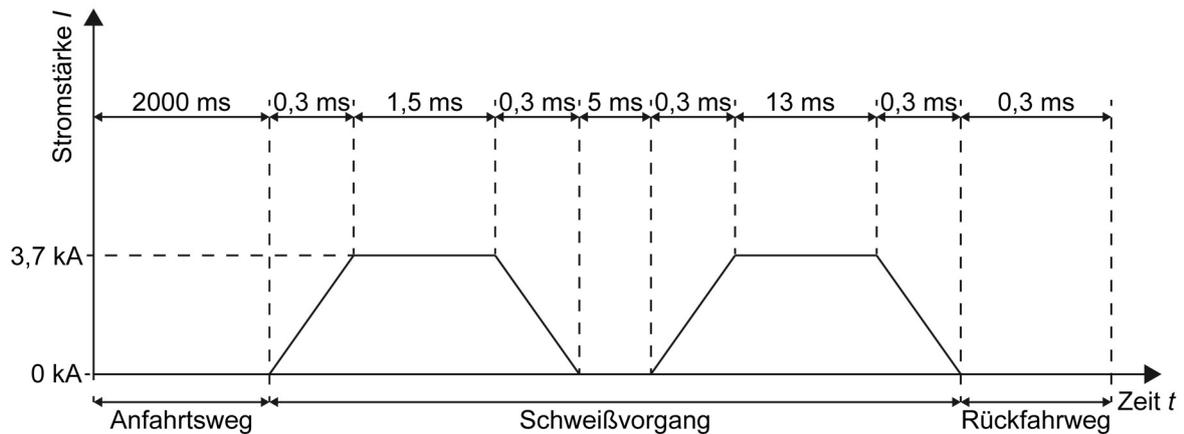


Abbildung 12-2: Schematische Darstellung des Schweißvorgangs der Widerstandspunktschweißungen gemäß Abschnitt 5.4

## A5 Vernetzung des Simulationsmodells

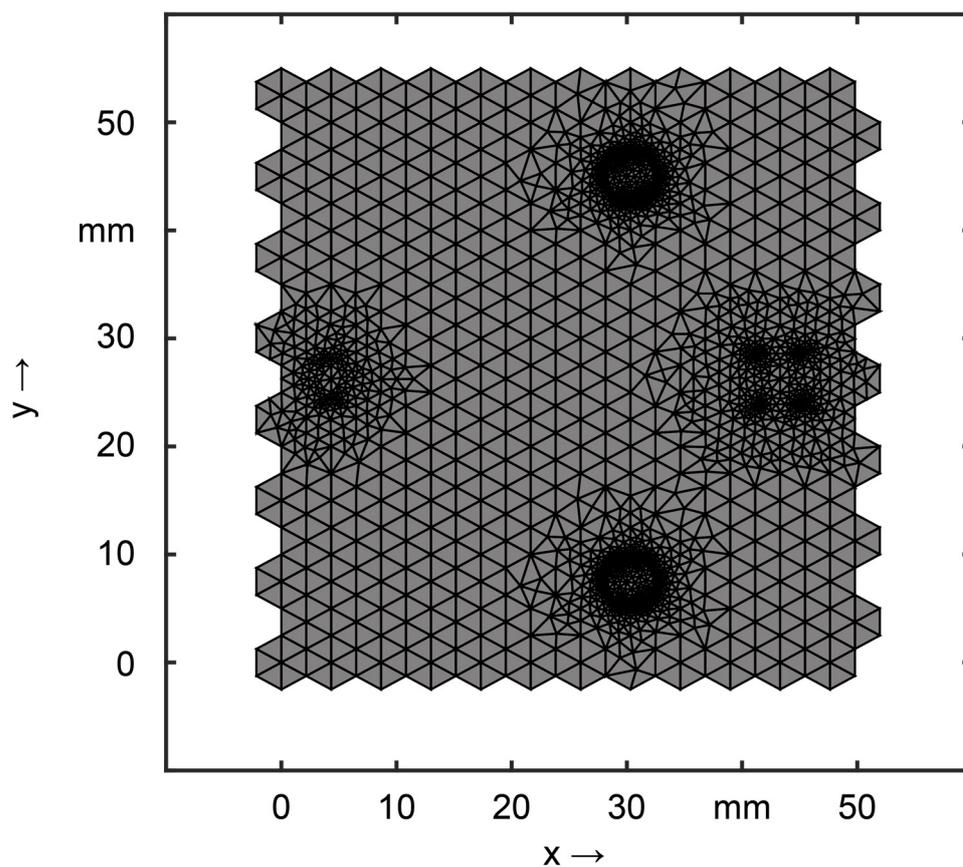


Abbildung 12-3: Freies Dreiecksnetz des Simulationsmodells aus Kapitel 7

## A6 Daten zur wirtschaftlichen Bewertung

Tabelle 12-3: Berechnung der Fertigungskosten für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit aus Abschnitt 8.5

Kosten	Einheit	Widerstandspunkt-schweißen	Laserstrahl-schweißen
Anschaffungskosten	in €	41.962 <sup>7</sup>	172.000 <sup>8</sup>
Nutzungsdauer	in Jahren	5	5
Arbeitsstunden <sup>9</sup>	in h/Jahr	3392	3392
<b>Abschreibungen</b>	<b>in €/h</b>	<b>2,47</b>	<b>10,14</b>
Zinssatz pro Jahr	in %	1,75	1,75
<b>Zinskosten pro Jahr</b>	<b>in €/h</b>	<b>0,11</b>	<b>0,44</b>
Platzbedarf	in m <sup>2</sup>	2	10
Betriebskostensatz	in €/m <sup>2</sup>	550	550
<b>Raumkosten</b>	<b>in €/h</b>	<b>0,32</b>	<b>1,62</b>
nominelle Leistung	in kW	11	8
Standardnutzungsfaktor	in %	1	20
Strompreis	in €/kWh	0,093	0,093
<b>Energiekosten</b>	<b>in €/h</b>	<b>0,01</b>	<b>0,15</b>
Instandhaltungskostensatz	%	7	7
<b>Instandhaltungskosten</b>	<b>in €/h</b>	<b>0,17</b>	<b>0,71</b>
<b>Maschinenstundensatz</b>	<b>in €/h</b>	<b>3,09</b>	<b>13,07</b>
Lohnkosten <sup>10</sup>	in €/h	33,40	33,40
<b>Arbeitsstundensatz</b>	<b>in €/h</b>	<b>36,49</b>	<b>46,47</b>
Fertigungszeit pro Verbund	in s	121	9,6
Bauteildrehung und -wechsel pro Takt	in s	35	35
Gesamttaktzeit	in s	156	44,6
<b>Fügekosten pro Verbund</b>	<b>in €/Stück</b>	<b>1,58</b>	<b>0,58</b>
Anlagenverfügbarkeit	in %	90	90
Maximale Anzahl an Zellverbunden pro Jahr	in Stück	70.449	246.414

<sup>7</sup> AMADA MIYACHI PECO AWS3

<sup>8</sup> TRUMPF TruDisk 2000 mit PFO 33-2

<sup>9</sup> Zwei Schichten mit 8 Stunden an 212 Arbeitstagen im Jahr

<sup>10</sup> Arbeitskosten pro Stunde in Deutschland (DESTATIS 2017)

