

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

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

Philipp Alexander Schmidt

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

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

Prüfer der Dissertation:

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

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

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

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

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

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

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

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

München, im Juli 2015

Philipp Schmidt

Inhaltsverzeichnis

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

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

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

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

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

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

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

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

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

| Variable | Einheit | Bedeutung |
|-----------------|-------------|--|
| n_{Rep} | - | Anzahl mehrfacher Überfahrten |
| n_{Stepp} | - | Anzahl der Steppnähte |
| n_t | - | Teilnehmer der Turniersélection |
| n_v | - | Anzahl der Optimierungsvariablen |
| $P_E; P_R; P_M$ | - | Anteil der neuen Generation, welcher durch Elitismus, Rekombination und Mutation erstellt wird |
| P_L | W | Laserleistung |
| $P_{L,Puls}$ | W | Laserleistung des Puls lasers |
| P_V | W | elektrische Verlustleistung |
| R | Ω | elektrischer Widerstand |
| R_0 | Ω | Widerstand bei Umgebungstemperatur |
| R_{I2} | $\mu\Omega$ | Widerstand zwischen den Messstellen U_1 und U_2 des Batteriemoduls |
| R_A | $\mu\Omega$ | Leiterwiderstand des Fügepartners A |
| R_B | $\mu\Omega$ | Leiterwiderstand des Fügepartners B |
| R_E | $\mu\Omega$ | Engewiderstand |
| R_F | $\mu\Omega$ | Fremdschichtwiderstand |
| R_I | Ω | Innenwiderstand des Voltmeters |
| $R_{I,el,m,j}$ | $\mu\Omega$ | Widerstand der Kontaktbedingung I der multikriteriellen Optimierung des Individuums j |
| $R_{I,j}$ | Ω | Widerstand der Kontaktbedingung I |
| $R_{ideal,I}$ | $\mu\Omega$ | idealer Verbindungswiderstand der Kontaktbedingung I |
| $R_{ideal,II}$ | $\mu\Omega$ | idealer Verbindungswiderstand der Kontaktbedingung II |
| R_L | $\mu\Omega$ | Leiterwiderstand |
| $R_{L,A}$ | $\mu\Omega$ | Widerstand des Leiters A |

| Variable | Einheit | Bedeutung |
|------------------|----------------|--|
| $R_{L,B}$ | $\mu\Omega$ | Widerstand des Leiters B |
| $R_{L,M}$ | Ω | Leiterwiderstand der Messleitung |
| $R_{L,S}$ | Ω | Leiterwiderstand der Stromleitung |
| R_M | Ω | Materialwiderstand |
| r_m | - | Mutationsrate |
| R_m | MPa | Zugfestigkeit |
| $R_{Optimum,I}$ | $\mu\Omega$ | Verbindungswiderstand des berechneten Optimums der Kontaktbedingung I |
| $R_{Optimum,II}$ | $\mu\Omega$ | Verbindungswiderstand des berechneten Optimums der Kontaktbedingung II |
| r_{OSZ} | mm | Radius der Strahloszillation |
| $R_{p0,2}$ | MPa | 0,2-%-Dehngrenze |
| r_{Punkt} | mm | Radius der Schweißpunkte |
| R_s | $\mu\Omega$ | Widerstand der Schweißnaht |
| R_X | $\mu\Omega$ | Verbindungswiderstand |
| R_g | Ω | Widerstand bei der Temperaturänderung $\Delta\theta$ |
| s | m | Pfad der elektrischen Feldlinien |
| S_L | J/m | Streckenenergie |
| s_M | - | Anzahl an Wiederholungen innerhalb einer Messreihe |
| SPP | mm·mrad | Strahlparameterprodukt |
| t | mm | Blechdicke |
| T | °C | Temperatur |
| t_A | mm | Blechdicke des Fügepartners A |
| t_B | mm | Blechdicke des Fügepartners B |
| T_p | °C | Temperatur der festen Phase |

| Variable | Einheit | Bedeutung |
|-----------------|-------------------|---|
| $t_{Prüf}$ | S | Prüfzeit bei der Widerstandsmessung |
| t_{Puls} | ms | Pulsdauer |
| T_{Ref} | °C | Referenztemperatur der Umgebung |
| T_s | °C | Schmelztemperatur |
| T_v | °C | Verdampfungstemperatur |
| U_A | V | Spannungsabfall (Fügepartner A) |
| $U_{A'}$ | V | Spannungsabfall über der Messstrecke l_x (Fügepartner A) |
| U_B | V | Spannungsabfall (Fügepartner B) |
| $U_{B'}$ | V | Spannungsabfall über der Messstrecke l_x (Fügepartner B) |
| U_M | V | Messspannung |
| U_{Pos} | V | Max. Spannungsabfall aufgrund der Prüfspitzenpositionierung |
| U_X | V | Spannungsabfall über dem Verbindungswiderstand R_X |
| $U_{X'}$ | V | Spannungsabfall über l_x (Fügeverbindung) |
| v_L | mm/s | Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls |
| x_{la} | mm | lateraler Abstand zur Bearbeitungszone |
| x_m | mm | Abstand der Temperaturmessstelle und der Schweißnaht |
| $Z_{el,I,j}$ | - | Zielfunktion der elektrischen Optimierung der Kontaktbedingung I eines Individuums j |
| $Z_{el,II,j}$ | N/mm ² | Zielfunktion der elektrischen Optimierung der Kontaktbedingung II eines Individuums j |
| $Z_{el,j}$ | - | Zielfunktion der elektrischen Optimierung eines Individuums j |

| Variable | Einheit | Bedeutung |
|-------------------|----------|---|
| $Z_{el,m,I,j}$ | N/mm^2 | Zielfunktion der multikriteriellen Optimierung der Kontaktbedingung I eines Individuums j |
| $Z_{el,m,j}$ | - | Zielfunktion der multikriteriellen Optimierung eines Individuums j |
| z_G | - | Anzahl berücksichtigter Generationen |
| $Z_{j,k,min}$ | - | Zielfunktionswert des besten Individuums einer Generation k |
| $Z_{m,I,j}$ | N/mm^2 | Zielfunktion der mechanischen Optimierung der Kontaktbedingung I eines Individuums j |
| $Z_{m,j}$ | N/mm^2 | Zielfunktion der mechanischen Optimierung eines Individuums j |
| z_R | mm | Rayleighlänge |
| Z_{stop} | - | Konvergenzschwelle |
| $Z_{T,j}$ | - | Zielfunktion zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften bei der multikriteriellen Optimierung eines Individuums j |
| α | 1/K | Wärmeausdehnungskoeffizient |
| α_{20} | 1/K | materialspezifischer Temperaturbeiwert bei 20 °C |
| β | - | Abbildungsverhältnis der Scanneroptik |
| β_{la} | ° | lateraler Anstellwinkel |
| β_{lo} | ° | longitudinaler Anstellwinkel |
| Δh_z | mm | Bauraumreduzierung in z-Richtung |
| Δl_x | mm | Verlängerung der Messstrecke |
| ΔR_{Temp} | K | Widerstandsänderung aufgrund der Temperaturänderung $\Delta \vartheta$ |
| Δt | s | Zeitintervall |
| ΔU_{12} | V | Potenzialdifferenz der Schweißpunktverteilung ($U_1 - U_2$) |

| Variable | Einheit | Bedeutung |
|-----------------------|---------------------------|--|
| $\Delta U_{12,ideal}$ | V | Potenzialdifferenz des vollflächig kontaktierten Definitionsbereichs ($U_1 - U_2$) |
| ΔU_{13} | V | Potenzialdifferenz der Schweißpunktverteilung ($U_1 - U_3$) |
| $\Delta U_{13,ideal}$ | V | Potenzialdifferenz des vollflächig kontaktierten Definitionsbereichs ($U_1 - U_3$) |
| ΔU_{23} | V | Potenzialdifferenz der Schweißpunktverteilung ($U_2 - U_3$) |
| $\Delta U_{23,ideal}$ | V | Potenzialdifferenz des vollflächig kontaktierten Definitionsbereichs ($U_2 - U_3$) |
| ΔU_{ideal} | V | Potenzialdifferenz des vollflächig kontaktierten Definitionsbereichs über der betrachteten Messstrecke |
| ΔU_m | V | Potenzialdifferenz der Schweißpunktverteilung ($\Delta U_m = U_1 - U_2$) |
| ΔU_{Mess} | V | Abweichung der gemessenen Spannung |
| ΔU_X | V | Gesamtabweichung der Spannung |
| $\vec{\nabla}U$ | V·m ⁻¹ | Gradient des elektrische Potentials |
| $\Delta\vartheta$ | K | Temperaturänderung |
| θ | ° | Strahlanstellung |
| Θ_f | ° | Öffnungswinkel |
| λ | nm | Wellenlänge |
| λ | W/(K·m) | Wärmeleitfähigkeit |
| λ_{Nd} | nm | Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers |
| λ_{Yb} | nm | Wellenlänge des Yb-Faserlasers |
| ν | - | Querkontraktionszahl |
| ξ | - | Straf-Term-Parameter |
| ρ | $\mu\Omega\cdot\text{mm}$ | spezifischer Materialwiderstand |
| ρ_A | $\mu\Omega\cdot\text{mm}$ | spezifischer Widerstand des Fügepartners A |

| Variable | Einheit | Bedeutung |
|------------------------|-----------------------------------|---|
| ρ_B | $\mu\Omega \cdot \text{mm}$ | spezifischer Widerstand des Fügepartners B |
| ρ_s | $\mu\Omega \cdot \text{mm}$ | spezifischer Widerstand der Schweißnaht |
| σ | $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ | elektrische Leitfähigkeit |
| σ_b | N/mm^2 | Biegespannung |
| $\sigma_{k,i,j}$ | N/mm^2 | Spannung eines Knotens k des Schweißpunktes i eines Individuums j |
| $\bar{\sigma}_{k,i,j}$ | N/mm^2 | mittlere Knotenspannung des Schweißpunktes i eines Individuums j |
| $\sigma_{max,el,m,j}$ | N/mm^2 | maximale Vergleichsspannung der multikriteriellen Optimierung eines Individuums j |
| $\sigma_{max,j}$ | N/mm^2 | maximale Vergleichsspannung eines Individuums j |
| $\sigma_{v,GEH}$ | N/mm^2 | Vergleichsspannung nach der GEH |
| $\sigma_{v,GEH,i,j}$ | N/mm^2 | Vergleichsspannung eines Schweißpunktes i eines Individuums j |
| σ_{zd} | N/mm^2 | Zug- bzw. Druckspannung |
| σ_{zul} | N/mm^2 | Grenzspannung |
| τ_t | N/mm^2 | Schubspannung |

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

“Die Leute werden in einigen Jahren auf Benzinmotoren zurückblicken so wie wir heute auf Dampfmaschinen und sagen: Es war eine gute Zeit, aber sie ist vorbei.” Elon Musk, CEO Tesla Motors (HAWRANEK 2014, S. 80)

Globale Entwicklungen wie die Urbanisierung, das Wirtschaftswachstum, die Ressourcenverknappung und der Klimawandel führen zu gesellschaftlichen Herausforderungen, die die zukünftige Mobilität massiv beeinflussen werden. Beispielsweise werden das Verkehrsaufkommen in den Städten, der Bedarf an fossilen Brennstoffen und die daraus resultierenden CO₂- und Schadstoffemissionen ansteigen. Elektro- und Hybridfahrzeuge bieten ein großes Potenzial, um diese gesellschaftlichen Herausforderungen der zukünftigen Mobilität nachhaltig zu bewältigen. (STEIGER 2014)

Eine Schlüsselrolle spielt dabei die *Lithium-Ionen-Batterie*. Der Begriff steht in diesem Kontext für eine wiederaufladbare Batterie – also einen Akkumulator. Bei der Anwendung der Lithium-Ionen-Technologie wird jedoch in der Fachsprache fast ausschließlich der Begriff Lithium-Ionen-Batterie (engl. Lithium-ion battery) oder Lithium-Ionen-Zelle (engl. Lithium-ion cell) verwendet. Diese Zelltechnologie ermöglicht hohe Reichweiten der Elektrofahrzeuge bei gleichzeitig ansprechender Fahrdynamik, was die neuen Fahrzeuge für den Kunden attraktiv gestaltet. Ein solcher Hochvoltspeicher besteht aus zahlreichen einzelnen Batteriezellen, die häufig mit Schraubverbindungen elektrisch kontaktiert werden. Diese Füge-technik ist unter den Gesichtspunkten *Leichtbau* (Masse der Verbindungselemente), *Produktion* (Fertigungszeit) und *Funktion* (elektrischer Widerstand) nicht befriedigend.

Ein zukunftsweisender Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien erfordert daher neue und innovative Fertigungsprozesse, um den elektrischen Kontakt zwischen den einzelnen Zellen herzustellen. Aufgrund der hohen Anzahl an Zellen, welche in Elektro- und Hybridfahrzeugen verbaut werden, wird ein automatisierter Fertigungsprozess mit kurzen Prozesszeiten und hoher Prozesssicherheit gefordert. Während der Kontaktierung der Zellen dürfen diese nicht mechanisch oder thermisch geschädigt werden. Zudem ist ein hohes Maß an Sicherheitsvorkehrungen notwendig, um Kurzschlüsse bei der Montage zu vermeiden. Von besonderer

Bedeutung ist eine hohe elektrische Leitfähigkeit der Kontakte, da beim Beschleunigen der Fahrzeuge Ströme von mehreren hundert Ampere auftreten. Diese generieren Verlustwärme, die sich auf das Kühlsystem der Traktionsbatterie auswirkt und somit die Effizienz des Batteriesystems verringert. Um diesen Effekt auf ein Minimum zu beschränken, müssen die Kontakte höchste elektrische Leitfähigkeit garantieren.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mit dem Verfahren Laserstrahlschweißen einen Fügeprozess für die elektrische Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batterien zu entwickeln, der den oben genannten Anforderungen unter Einhaltung produktionstechnischer und funktionaler Rahmenbedingungen genügt. Dazu musste zunächst eine Messtechnik aufgebaut werden, welche eine hochgenaue Messung elektrischer Widerstände erlaubt. Anschließend war es das Ziel, hoch leitfähige elektrische Kontakte bei gleichzeitig geringer thermischer Belastung der Batteriezellen während des Laserstrahlschweißens herzustellen. Eine simulationsgestützte Methode zur Auslegung der elektrischen Kontakte sollte dabei Anwendung finden. Zur prozesssicheren Verbindung von Aluminium und Kupfer, die als Ableiter-Werkstoffe an den Zellen vorliegen, sollen Lösungsbausteine unter der Berücksichtigung von alternativen Fügeverfahren erarbeitet werden. Abschließend soll eine technologische und wirtschaftliche Bewertung des entwickelten Fügeprozesses anhand eines Batteriemoduls als Anwendungsbeispiel erläutert werden.

1.3 Vorgehensweise

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst in Kapitel 2 die wesentlichen Grundlagen zur elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batterien und zur Füge-technologie Laserstrahlschweißen beschrieben. Kapitel 3 fasst das in der Literatur vorhandene Wissen über die Möglichkeiten zum Laserstrahlschweißen der Werkstoffe Aluminium und Kupfer sowie von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen zusammen. Zudem wird auf die elektrische Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batterien eingegangen. Anschließend wird in Kapitel 4 der Versuchsaufbau zum Laserstrahlschweißen und ein Prüfstand zur hochgenauen Widerstandsmessung erläutert. Basierend auf der vorgestellten Systemtechnik

werden in Kapitel 5 laserstrahlgeschweißte Kontakte hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften und der thermischen Belastung der Kontaktstelle während des Fügens untersucht. Darauf aufbauend wird in Kapitel 6 eine Methode zur simulationsgestützten Auslegung elektrischer Kontakte beschrieben und verifiziert. Die Anwendung und Bewertung dieser Methode wird in Kapitel 7 anhand eines Batteriemoduls beschrieben, bevor die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten schließt. Das aufgeführte Vorgehen ist in **Abbildung 1-1** schematisch zusammengefasst.

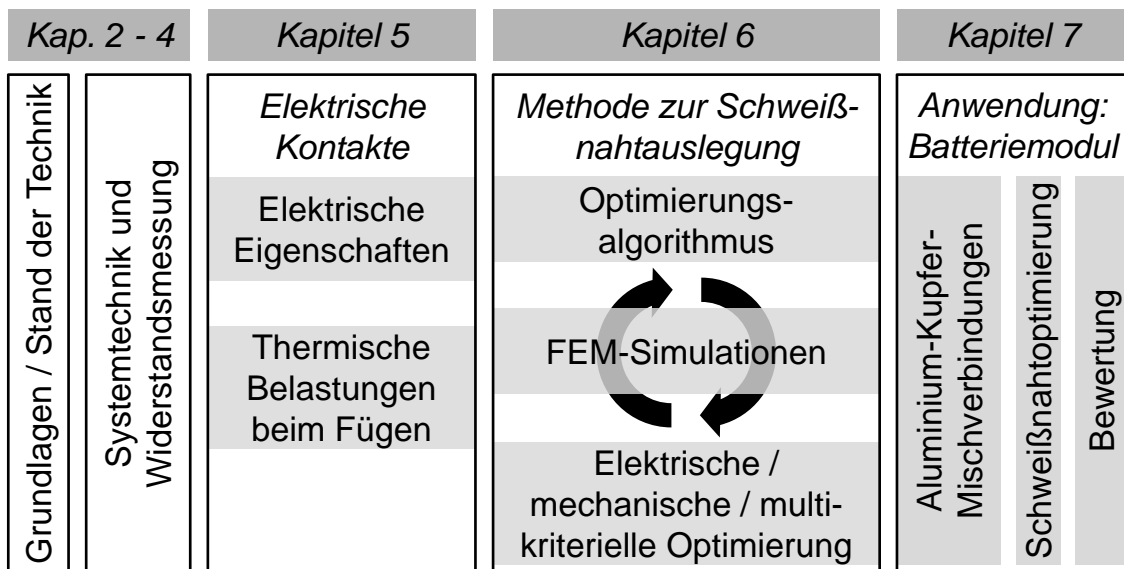


Abbildung 1-1: Bausteine der Vorgehensweise mit Bezug zu den Kapiteln der vorliegenden Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Allgemeines

Das Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien muss, wie bereits in Abschnitt 1.1. erwähnt, sowohl die Anforderungen an die Eigenschaften der elektrischen Kontakte als auch an den Fügeprozess erfüllen. Daher werden in diesem Kapitel die für diese Arbeit relevanten Grundlagen zum Aufbau von Batteriesystemen für Elektro- und Hybridfahrzeuge sowie zur Lasermaterialbearbeitung der eingesetzten Leiterwerkstoffe Aluminium und Kupfer beschrieben. Für die Bewertung der elektrischen Eigenschaften gefügter Kontakte wird zum einen die Theorie kraftschlüssiger und stoffschlüssiger Kontakte und zum anderen die benötigte Messmethode zur hochpräzisen Messung von elektrischen Verbindungswiderständen erläutert. Zudem werden die für die nächsten Kapitel erforderlichen Grundlagen zur Optimierung mit evolutionären Algorithmen einführend beschrieben.

2.2 Batteriesysteme für Elektro- und Hybridfahrzeuge

2.2.1 Allgemeines

Ein *Batteriesystem*, welches in Elektro- und Hybridfahrzeugen eingesetzt wird, wird auch *Traktionsbatterie* genannt. Es besteht aus einer Vielzahl an sekundären, also wiederaufladbaren *Lithium-Ionen-Batterien*. Die Begriffe *Lithium-Ionen-Batterie*, *Lithium-Ionen-Akkumulator*, kurz *Lithium-Ionen-Akku*, oder *Lithium-Ionen-Zelle* können gleichermaßen verwendet werden. In all diesen Fällen wird von einer einzelnen *Batteriezelle* innerhalb eines *Batteriesystems* gesprochen. In der Fachliteratur haben sich jedoch die Begriffe Lithium-Ionen-Batterie und Lithium-Ionen-Zelle durchgesetzt (KORTHAUER 2013, S. 95). In dieser Arbeit wird fortlaufend der Begriff Lithium-Ionen-Zelle gebraucht. Auf die elektrochemische Funktionsweise der Lithium-Ionen-Zelle wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen. Diese ist in einschlägiger Literatur beschrieben (JOSSEN & WEYDANZ 2006, REDDY & LINDEN 2011, KORTHAUER 2013).

2.2.2 Aufbau von Batteriesystemen

Batteriesysteme von Hybridfahrzeugen beinhalten, abhängig von der geforderten Reichweite, die das Fahrzeug elektrisch fahren können soll, und von der Kapazität der Zellen, bis zu hundert Lithium-Ionen-Zellen. In reinen Elektrofahrzeugen können mehrere hundert Zellen verbaut werden. Abhängig von der elektrischen Verschaltung der Zellen und dem zur Verfügung stehenden Bauraum werden mehrere Lithium-Ionen-Zellen zu einem *Batteriemodul* verbaut. Diese Untereinheiten bieten Vorteile bei der Handhabung und der Montage des *Batteriesystems*. Batteriemodule werden anschließend zu einer *Hochvoltbatterie* zusammengefügt und in ein Batteriesystem integriert (vgl. **Abbildung 2-1**).

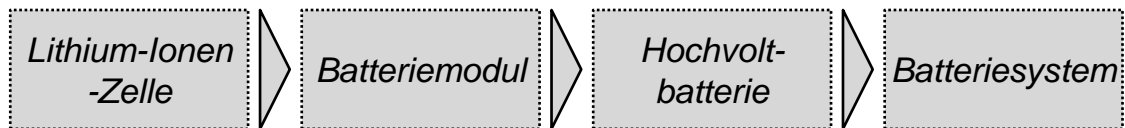


Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau eines Batteriesystems

Die Steuerung des Batteriesystems übernimmt das *Batteriemanagementsystem*, das über Spannungsabgriffe auf den einzelnen Lithium-Ionen-Zellen und über Temperatursensoren eine Überwachung des Gesamtsystems zulässt. Im Gefahrenfall kann das Batteriesystem über das *Schütz* spannungsfrei geschaltet werden. Eine weitere Komponente stellt das *Kühlsystem* der Traktionsbatterie dar. **Abbildung 2-2** beinhaltet eine Übersicht der Komponenten des beschriebenen Batteriesystems (PRASSEK 1996). Im Folgenden wird auf den Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle sowie die elektrische Kontaktierung eines Batteriemoduls eingegangen.

2.2.3 Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie

Die Lithium-Ionen-Technologie wird in der Automobilindustrie aufgrund hoher gravimetrischer Energie- und Leistungsdichten für den Einsatz in Elektro- und Hybridfahrzeugen favorisiert. Frühere Technologien, wie Bleiakkumulatoren oder Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren, wurden von den Lithium-Ionen-Batterien abgelöst. Die hohen Energie- und Leistungsdichten der Lithium-Ionen-Batterien können durch die hohe Zellspannung von bis zu 4,2 V erreicht werden (HRACH & CIFRAIN 2011). Ein weiterer entscheidender Vorteil ist die hohe kalendarische Lebensdauer der Lithium-Ionen-Zelle, welche bei einer Fahrzeuglebensdauer von über 8.000 Betriebsstunden verlangt wird (TUEBKE 2010).

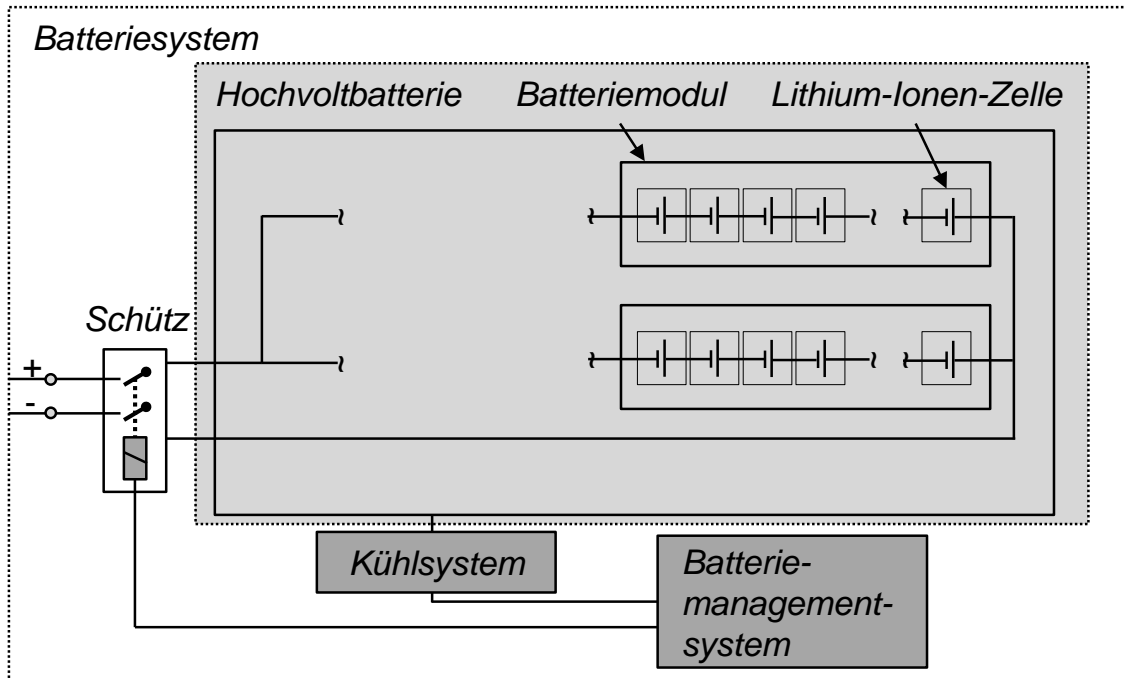


Abbildung 2-2: Aufbau und Komponenten eines Batteriesystems für Elektro- und Hybridfahrzeuge (nach PRASSEK 1996, S. 36)

Maßgebend ist dabei die Kapazität der Zelle am Ende der Fahrzeuglebensdauer. Fahrzeughersteller fordern, dass dem Nutzer 80% der Ausgangskapazität am Ende der Fahrzeuglebensdauer zur Verfügung stehen (SCHMIDT ET AL. 2013B).

Der Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle ist für die elektrische Kontaktierung von großer Bedeutung. Die Hauptbestandteile der Zelle sind die positive bzw. die negative Elektrode (Kathode und Anode), der Separator und der Elektrolyt. Ein gestapelter oder gewickelter Verbund aus mehreren Anoden, Separatoren und Kathoden wird mit einem Gehäuse zur Batteriezelle montiert. Das Anodenmaterial (Graphit) und das Kathodenmaterial (Nickel-Mangan-Kobaltoxid) befinden sich auf einer Trägerfolie, welche im Fall der Anode aus dem Werkstoff Kupfer besteht. Kupfer ist im Potentialbereich der Anode stabil und reagiert somit nicht mit Lithium oder Elektrodenbestandteilen. Im Fall der Kathode wird als Trägerfolie Aluminium gewählt. Aluminium ist im Potentialbereich der Kathode nicht reaktiv mit Lithium. Beide Werkstoffe weisen zudem eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit auf, was Verluste innerhalb der Zelle reduziert. Die Trägerfolien mit Dicken von 10 bis 20 μm sind mit den Anoden- bzw. Kathodenmaterialien beschichtet. Der Separator hat die Aufgabe, beide Elektroden elektrisch voneinander zu isolieren. Die hochporöse Folie aus Polypropylen oder Polyethylen gewährleistet mit Hilfe des Elektrolyten (Leitsalz) die ionische Leitfähigkeit von

Li^+ -Ionen zwischen Anode und Kathode. Der Aufbau der Lithium-Ionen-Zelle wird in **Abbildung 2-3** verdeutlicht. (KURFER 2013)

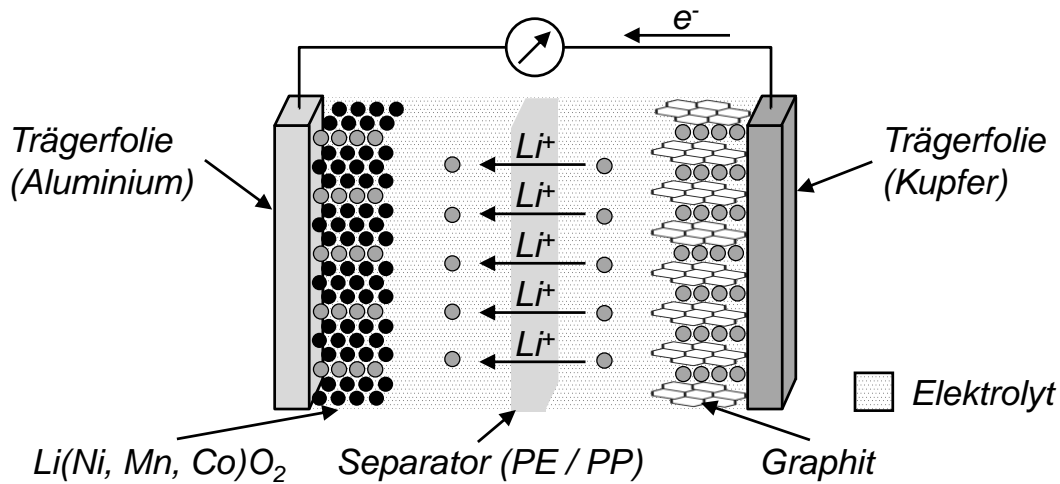


Abbildung 2-3: Aufbau und schematische Funktionsweise des Entladevorgangs einer Lithium-Ionen-Zelle (nach KORTHAUER 2013, S.15)

Ein Gehäuse aus Aluminium bildet die Systemgrenze der Zelle. Die Stromableiter werden innerhalb der Zelle an die Zellterminals gefügt und aus der Zelle herausgeführt. Über die Zellterminals kann die elektrische Leistung abgegriffen werden. Zwischen Zellgehäuse und Zellterminal befindet sich üblicherweise ein Dichtelement, um das Zellgehäuse gegenüber der Durchführung der Zellterminals abzudichten. In **Abbildung 2-4** wird eine prismatische Lithium-Ionen-Zelle mit den oben beschriebenen Einzelkomponenten gezeigt.



Abbildung 2-4: Aufbau einer prismatischen Lithium-Ionen-Zelle für den Einsatz in Elektrofahrzeugen mit einer Kapazität von 30 bis 38 Ah (nach POMPETZKI 2013)

Tabelle 2-1 dokumentiert die in Traktionsbatterien häufig eingesetzten Materialien der jeweiligen Zellbestandteile (KORTHAUER 2013).

Tabelle 2-1: Materialien der Zellbestandteile einer in Traktionsbatterien eingesetzten Lithium-Ionen-Zelle (KORTHAUER 2013, S. 25)

| Zellbestandteile | Werkstoffbezeichnung |
|-------------------------|---|
| Elektroden­träger­folie | Aluminium (Kathode, Dicke: 15 - 25 µm), Kupfer (Anode, Dicke: 6 - 15 µm) |
| Kathoden­beschichtung | Nickel-Mangan-Kobaltoxid, $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ |
| Anoden­beschichtung | Graphit |
| Separator | Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) |
| Elektrolyt | LiPF_6 (Leitsalz) |
| Stromableiter der Zelle | Aluminium (Kathode), Kupfer (Anode) |
| Dichtungselemente | Polyethylen (PE), Polytetrafluorethylen (PTFE) |
| Zellgehäuse | Aluminium |

Eine Lithium-Ionen-Zelle birgt durch die chemischen Bestandteile der Aktivmaterialien und des Elektrolyten sowie durch ihren hohen Energieinhalt ein hohes chemisches und elektrisches Gefahrenpotential. Ferner werden bei erhöhter Temperaturbelastung der Batterien Alterungsprozesse beschleunigt. Dies muss bei den Fügeprozessen berücksichtigt werden. Bereits bei Temperaturen von 65 °C beginnen Zersetzungsreaktionen des Elektrolyten, was die Leistungsfähigkeit der Zelle irreversibel reduziert (RAVDEL ET AL. 2003, ARAKI & SATO 2003). Batteriesysteme werden daher für den Dauerbetrieb durch Kühlsysteme auf Temperaturen unterhalb von 60 °C temperiert. Wird die Lithium-Ionen-Batterie Temperaturen größer als 80 °C ausgesetzt, wird der Alterungsprozess der Anodenmaterialien negativ beeinflusst. Die Grenzschicht am Übergang von der Graphitelektrode zum Elektrolyten, das sogenannte „Solid Electrolyte Interface“ (SEI), kann bei dieser Temperaturbelastung geschädigt werden. Eine Reduzierung der Lebensdauer und der Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen-Zelle sind die Folge (VETTER ET AL. 2005, BRAND ET AL. 2013A). Werden Temperaturen von 130 °C überschritten, beginnt der Separator aus Polyethylen zu schmelzen. Dies kann einen Funktionsverlust der Zelle zur Folge haben. Polypropylen-Separatoren sind bis zu einer Temperatur von 160 °C stabil (KORTHAUER 2013, S. 84). Durch ein Aufschmelzen des Separators kann es zudem zu inneren

Kurzschlüssen kommen, die zu einem thermischen Durchgehen (Thermal Runaway) der Lithium-Ionen-Zelle führen können. Bei einem Thermal Runaway steigt die Zelltemperatur aufgrund der Oxidation des Elektrolyten und begünstigt durch weitere Zersetzungsreaktionen der Zellkomponenten unkontrollierbar an, bis hin zu einem Zellbrand (KORTHAUER 2013, S. 286). Dieser Effekt kann auch bei einer mechanischen Beschädigung des Zellgehäuses oder einem externen Kurzschließen der Zelle auftreten. Die zulässigen Temperaturen für den Elektrolyten, die Anode und den Separator sind in **Tabelle 2-2** zusammengefasst.

Tabelle 2-2: Maximal zulässige Temperaturen der temperaturempfindlichen Zellkomponenten einer Lithium-Ionen-Batterie für die Anwendung in Elektro- und Hybridfahrzeugen (RAVDEL ET AL. 2003, BRAND ET AL. 2013A, KORTHAUER 2013)

| Komponenten der Zelle | Max. zulässige Temperatur |
|------------------------------|----------------------------------|
| Elektrolyt | 65 °C |
| Anode | 80 °C |
| Separator | 130 °C (PE), 160 °C (PP) |

2.2.4 Elektrische Kontaktierung eines Batteriemoduls

Bei der elektrischen Kontaktierung eines Batteriemoduls werden die Kontakte zwischen den einzelnen Batteriezellen hergestellt. In einem Batteriemodul werden üblicherweise 6 bis 13 Lithium-Ionen-Zellen verbaut. Ein Batteriemodul bietet den Vorteil einer standardisierten Herstellung, da es in unterschiedlicher Anzahl und Lage in verschiedene Batteriesysteme eingebaut werden kann. Ein weiterer Vorteil von Batteriemodulen entsteht bei der Montage zu einem Batteriesystem, da diese eine Spannungslage unterhalb von 60 V aufweisen. Dadurch kann im Sinne des Arbeitsschutzes nach der International Organization for Standardization ISO/DIS 6469-1 auf einen gesonderten Berührschutz für Spannung führende Bauteile verzichtet werden. Hierdurch lassen sich gegenüber Batteriesystemen ohne Modulbauweise erhebliche Kosteneinsparungen in der Montage von Traktionsbatterien realisieren.

Für die elektrische Verschaltung der Zellen in einem Batteriemodul können, abhängig von den an das Batteriesystem gestellten Anforderungen, Serienschaltungen oder Parallelschaltungen eingesetzt werden. Gleiches gilt für die elektrische

Verschaltung einzelner Batteriemodule. Eine Serienschaltung der Zellen oder der Batteriemodule führt zu einer Erhöhung der Spannungslage des Batteriemoduls bzw. des Batteriesystems. Wird eine gleiche Leistungsentnahme vorausgesetzt, führt dagegen eine Parallelschaltung bei gleicher Spannungslage zu einem Anstieg des maximalen Betriebsstroms. Dies kann sich nachteilig auswirken, da höhere Ströme im Zellverbund nach dem Joule'schen Gesetz zu einer quadratischen Erhöhung der elektrischen Verluste im Gesamtsystem führen. Die elektrische Verlustleistung wird über Gleichung (2-1) berechnet:

$$P_V = I^2 \cdot R \quad (2-1)$$

mit

P_V : Elektrische Verlustleistung

I : Strom

R : Elektrischer Widerstand

Eine Serienschaltung von mehreren parallel geschalteten Zellen wird häufig dann gewählt, wenn die Spannung des Batteriesystems durch zu viele seriell geschaltete Lithium-Ionen-Zellen 400 V überschreitet, denn die Komponenten der Leistungselektronik des Batteriesystems sind für höhere Spannungslagen nicht ausgelegt. Zur Überwachung des Batteriesystems werden die Spannungen aller Zellen überwacht. Bei parallel geschalteten Zellen wird dieser Aufwand reduziert, da lediglich pro parallel geschaltetem Zellverbund ein Spannungsabnehmer eingesetzt werden muss (KORTHAUER 2013, S. 97). Bei der elektrischen Kontaktierung zwischen den Lithium-Ionen-Zellen stellt die Serienschaltung der Zellen oder parallel geschalteter Zellverbunde eine besondere Herausforderung dar. Durch das Kontaktieren von Anode und Kathode wird eine Verbindung der Ableiterwerkstoffe Aluminium und Kupfer hergestellt.

Das Fügen dieser artverschiedenen Werkstoffe bringt aus metallurgischer und produktionstechnischer Sicht große Problemstellungen mit sich. Eine detaillierte Betrachtung dieser Herausforderungen folgt in Abschnitt 2.3.6. Je nach Aufbau der Lithium-Ionen-Zelle bzw. der Zellverbinder befindet sich der Übergang von Aluminium zu Kupfer im Zellverbinder, in der Zelle oder zwischen Zellverbinder und Anode (siehe **Abbildung 2-5**). Die elektrische Kontaktierung kann dadurch artgleich oder artverschieden realisiert werden. Eine artgleiche Verbindung liegt vor, wenn der Aluminium-Kupfer-Übergang in den Zellverbinder oder innerhalb der Lithium-Ionen-Zelle in die Anode verlagert wird (siehe **Abbildung 2-5 a** und **b**). Bei der Zellkontaktierung werden somit Aluminium-Aluminium- und

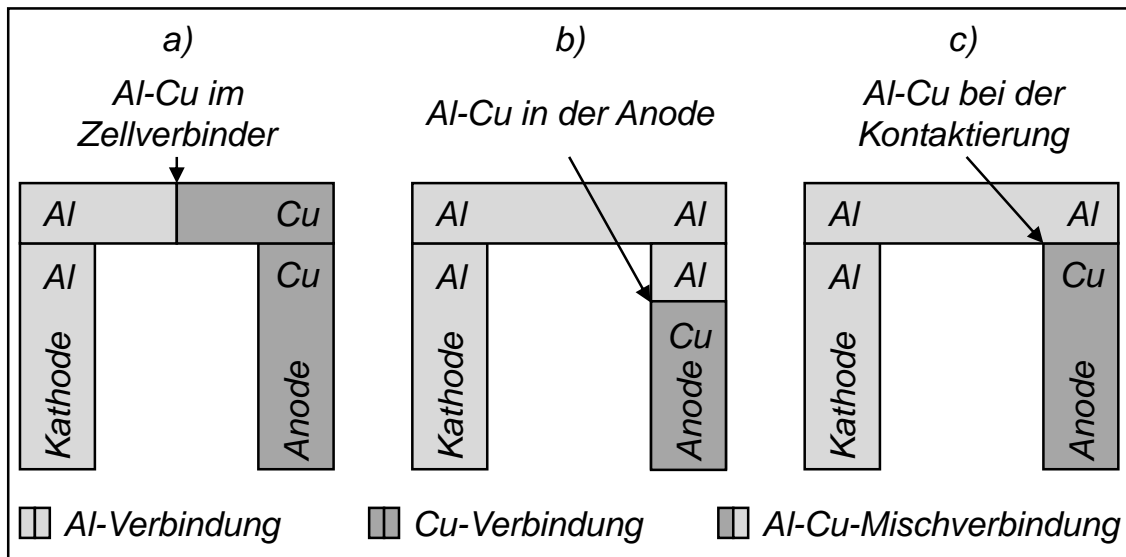


Abbildung 2-5: Möglichkeiten zur Realisierung der Aluminium-Kupfer-Mischverbindung bei der Zellkontaktierung; a) Mischverbindung im Zellverbinder, b) Mischverbindung in der Anode und c) Mischverbindung bei der Kontaktierung

Kupfer-Kupfer-Verbindungen gefügt. Wird ein Aluminium-Zellverbinder mit der Kupfer-Anode kontaktiert, entsteht eine Aluminium-Kupfer-Mischverbindung (siehe **Abbildung 2-5 c**).

Bei der Parallelschaltung der Zellen wird eine artgleiche elektrische Verbindung hergestellt. **Abbildung 2-6** veranschaulicht zum einen die elektrische Schaltung von Batteriezellen innerhalb eines Batteriemoduls und zum anderen eine mögliche Umsetzung der Verschaltung mit beispielsweise 12 Lithium-Ionen-Zellen. In Batteriemodul 1 werden alle 12 Zellen seriell geschaltet. In Batteriemodul 2 werden zwei parallel geschaltete Zellen in Serie kontaktiert. Dieses System kann je nach Zellanzahl auf drei oder mehr parallel geschaltete Batteriezellen erweitert werden.

2.2.5 Anforderungen an die elektrische Kontaktierung

Die Anforderungen an die elektrische Kontaktierung der Lithium-Ionen-Batterien innerhalb eines Batteriemoduls lassen sich in die Bereiche *Leichtbau*, *Produktion* und *Funktion* unterteilen.

Leichtbau

Der Leichtbau nimmt eine zentrale Rolle bei der Entwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen ein. Die zusätzliche Masse des Hochvoltspeichers im Gesamt-

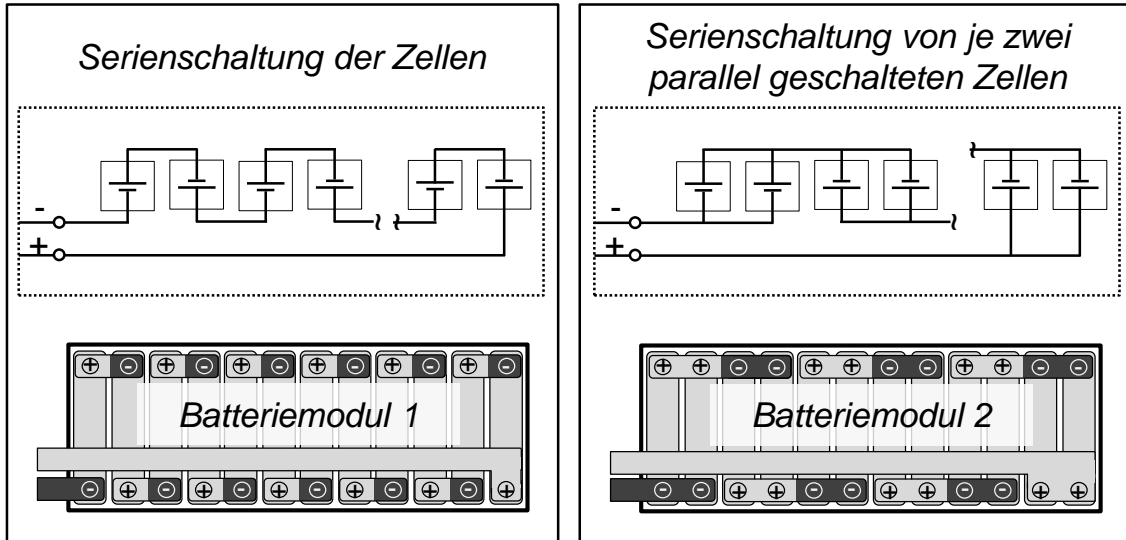


Abbildung 2-6: *Serielle Schaltung der Zellen in Batteriemodul 1 (links) und serielle Schaltung von je zwei parallel geschalteten Zellen in Batteriemodul 2 (rechts)*

fahrzeug soll durch eine hohe Energiedichte der Batteriemodule so gering wie möglich gehalten werden. Das bedeutet, dass Strukturkomponenten, Kontaktelemente wie Zellverbinder und Zelleiter, oder Kontaktelemente zur elektrischen Verbindung von mehreren Modulen mit möglichst geringer Masse konstruiert und ausgelegt werden müssen. Die Fügetechnologie zur Herstellung der elektrischen Verbindung hat dabei einen großen Einfluss auf die Umsetzung einer leichtbaugerechten Kontaktierung der Batteriezellen.

Produktion

Die elektrische Kontaktierung ist ein Teilschritt der Montage eines Batteriemoduls. Dabei beziehen sich die produktionstechnischen Anforderungen auf die Arbeitssicherheit während des Montageprozesses, die Qualität und die Fertigungszeit. Bei der Montage einzelner Zellen in einem Batteriesystem ist darauf zu achten, dass das Zellgehäuse durch Handhabungswerkzeuge bzw. den Montageprozess nicht beschädigt wird. Beim Einsatz von Montagewerkzeugen dürfen keine Kurzschlüsse als Folge einer Kontaktierung von Anode und Kathode über das Werkzeug auftreten. Temperaturempfindliche Komponenten der Zelle können bei Montageprozessen mit erhöhter Temperaturbelastung von über 65 °C beschädigt werden (vgl. Abschnitt 2.2.3). Dies muss ausgeschlossen werden. Die geforderte Fertigungszeit für die elektrische Kontaktierung richtet sich nach der Auslegung der Serienproduktion zur Batteriesystemmontage. Nach PAULESER & SCHMIDT (2014) werden Fertigungszeiten kleiner 60 Sekunden für die Montage

eines Batteriemoduls gefordert. Für ein Batteriemodul mit beispielsweise 12 Lithium-Ionen-Batterien ergibt sich damit eine zulässige Fertigungszeit von weniger als 2,5 Sekunden pro Kontakt.

Funktion

Die Hauptfunktion von elektrischen Kontakten besteht in der möglichst verlustfreien Übertragung von elektrischer Energie. In Hochvoltspeichern für Elektro- und Hybridfahrzeuge können unter Volllast, abhängig vom Typ der verbauten Lithium-Ionen-Batterie und der Auslegung des Batteriesystems, kurzzeitig Ströme von 240 A abgerufen werden (POMPETZKI 2013). Daher bestehen besondere Anforderungen an die elektrischen Widerstände der Kontakte zwischen Lithium-Ionen-Batterien. Kontaktwiderstände in der Größenordnung von 10^{-5} bis $10^{-6} \Omega$ können bei entsprechend hohen Strömen zu beträchtlichen Verlustleistungen führen, vgl. Gleichung (2-1). Dies resultiert in einer Erwärmung der elektrischen Kontakte im Betrieb und einer Erhitzung der Lithium-Ionen-Batterien durch Wärmeleitung in die Zelle. Über das Kühlsystem werden diese Verluste zwar kompensiert, was sich aber negativ auf die Energiebilanz des Batteriesystems auswirkt. Folglich wird dadurch die elektrische Reichweite der Kraftfahrzeuge verringert.

Eine weitere Anforderung an die Funktion elektrischer Kontakte besteht darin, dass die Widerstände der Kontakte über die Fahrzeuglebensdauer einen konstanten Wert aufweisen müssen. Dies ist insbesondere bei der Parallelschaltung von Lithium-Ionen-Batterien wichtig. Bei Abweichungen von Widerständen bei parallel geschalteten Batterien werden die Zellen im Betrieb ungleich belastet. An einer Zelle mit geringeren Leitungs- und Kontaktwiderständen fließt dann ein höherer Strom. Dadurch kann eine gleichmäßige Alterung der Batteriezellen, welche maßgeblich vom Betrieb der Zellen abhängt, nicht mehr gewährleistet werden (BRAND ET AL. 2013B).

2.3 Lasermaterialbearbeitung

2.3.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Grundlagen zur Lasermaterialbearbeitung zusammengefasst. Darüber hinaus werden das Laserstrahlschweißen der Werkstoffe Aluminium und Kupfer sowie von Alumi-

nium-Kupfer-Mischverbindungen erläutert. Für eine umfassende Beschreibung der Lasermaterialbearbeitung wird auf einschlägige Literatur verwiesen (POPRAWA 2005, HUEGEL & GRAF 2007).

2.3.2 Laserstrahleigenschaften und Prozessgrößen

Für die Lasermaterialbearbeitung ist die Fokussierung der Laserstrahlung von entscheidender Bedeutung. Mit Hilfe der *Laserstrahlkaustik* kann diese beschrieben werden. **Abbildung 2-7** illustriert die Kaustik eines Laserstrahls mit den dazugehörigen Kenngrößen.

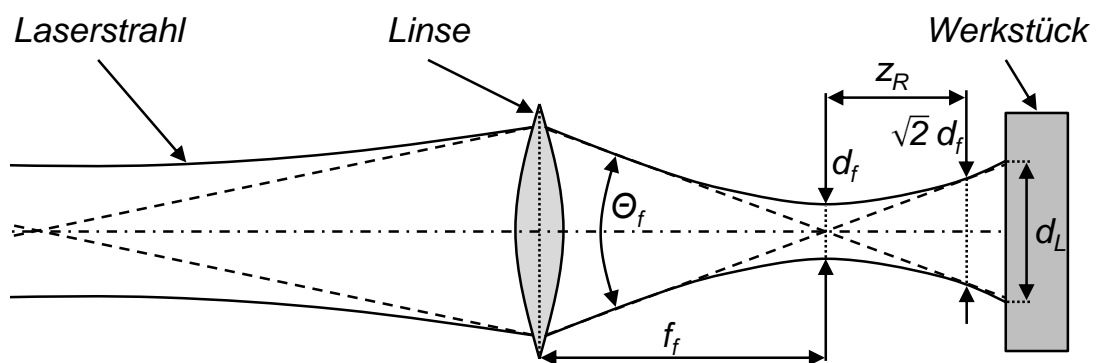


Abbildung 2-7: Kaustik eines Laserstrahls im Freistahl mit den charakteristischen Kenngrößen bis zum Auftreffen auf dem Werkstück (nach HUEGEL & GRAF 2007, S. 34)

Wird ein Laserstrahl über eine optische Linse fokussiert, stellt sich in Abhängigkeit der Brennweite f_f der minimale Strahldurchmesser, der Fokusdurchmesser d_f , im Fokuspunkt ein. Die Rayleighlänge z_R gibt an, in welchem Abstand zum Fokuspunkt sich die Laserspotfläche bezogen auf den Fokusdurchmesser d_f verdoppelt. Über Gleichung (2-2) kann der Öffnungswinkel Θ_f bestimmt werden. Der Öffnungswinkel Θ_f und die Rayleighlänge z_R sind wichtige Kenngrößen zur Laserstrahlcharakterisierung. Es gilt:

$$\Theta_f = \frac{d_f}{z_R} \quad (2-2)$$

mit

- Θ_f : Öffnungswinkel
- d_f : Fokusdurchmesser im Fokuspunkt
- z_R : Rayleighlänge

Als Bewertung der Strahlqualität einer Laserstrahlquelle hat sich das Strahlparameterprodukt SPP etabliert, welches die Kenngrößen Öffnungswinkel Θ_f und Fokusbildungsdurchmesser d_L in einem Wert zusammenfasst. Das Strahlparameterprodukt bzw. die Beugungsmaßzahl M^2 gibt die Fokussierbarkeit des erzeugten Laserstrahls an und lässt sich mit Gleichung (2-3) berechnen:

$$SPP = \frac{d_f \cdot \Theta_f}{4} = M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi} \quad (2-3)$$

mit

SPP : Strahlparameterprodukt

M^2 : Beugungsmaßzahl

λ : Wellenlänge

Zur Charakterisierung des Laserbearbeitungsprozesses sind die Streckenenergie S_L und die Laserstrahlintensität I_L hervorzuheben. Die Streckenenergie wird mit Hilfe der Laserleistung P_L und der Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls v_L über Gleichung (2-4) bestimmt. Es gilt:

$$S_L = \frac{P_L}{v_L} \quad (2-4)$$

mit

S_L : Streckenenergie

P_L : Laserleistung

v_L : Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls

Die Laserstrahlintensität I_L wird über Gleichung (2-5) berechnet. Maßgebend sind dabei die Laserleistung P_L und die Größe der Laserspotfläche, die sich bei einem senkrechten Einstrahlwinkel aus einer Kreisfläche mit dem Durchmesser des Laserstrahls d_L auf dem Werkstück ergibt. Es gilt:

$$I_L = \frac{4 \cdot P_L}{\pi \cdot d_L^2} \quad (2-5)$$

mit

I_L : Laserstrahlintensität

d_L : Durchmesser des Laserstrahls auf dem Werkstück

2.3.3 Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück

Trifft ein Laserstrahl auf die Oberfläche des Werkstücks, wird die elektromagnetische Strahlung in den oberflächennahen Bereichen absorbiert und erwärmt diese. Die auftretenden physikalischen Effekte der Energieeinkopplung werden maßgeblich von der dort herrschenden Temperatur bestimmt. Diese stellt sich in Abhängigkeit von der absorbierten Energie und der in das Werkstück abfließenden Wärme ein. Die lokale Erwärmung des Werkstücks führt zur Ausbildung einer Wärmeeinflusszone (WEZ). **Abbildung 2-8** zeigt mögliche Phänomene, die bei der Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei unterschiedlicher Intensität des Laserstrahls I_L auftreten können. Die genannten Leistungsdichten sind erheblich vom Werkstoff abhängig und sollen lediglich zur Orientierung dienen.

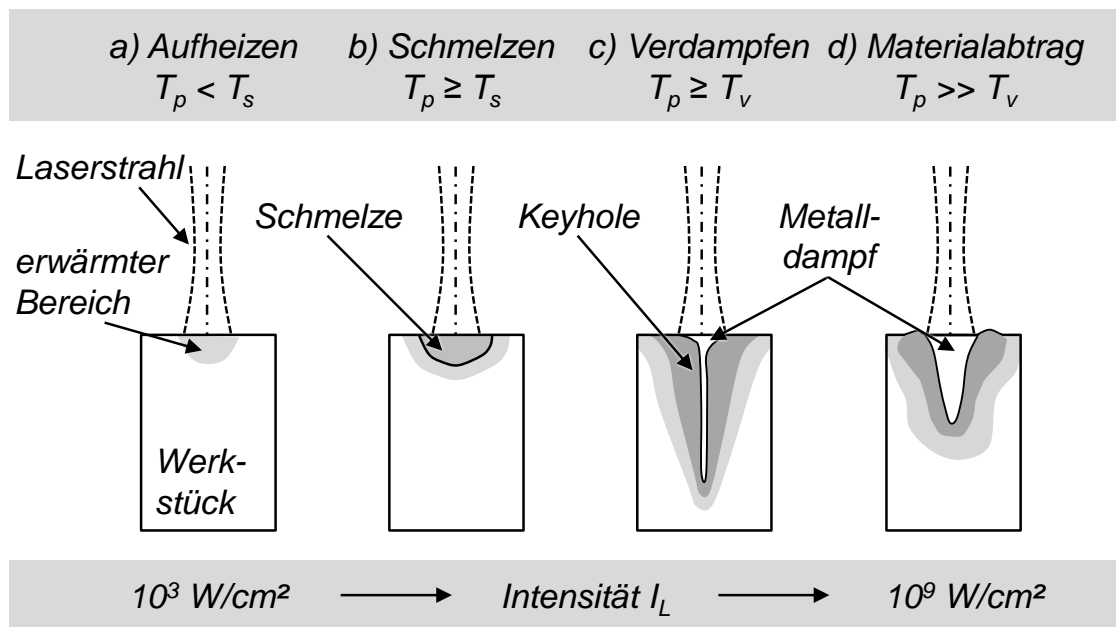


Abbildung 2-8: Wechselwirkung von Laserstrahl und Werkstück bei steigender Intensität und mögliche Mechanismen der Energieeinkopplung für metallische Werkstoffe; a) Aufheizen, b) Schmelzen, c) Verdampfen und d) Materialabtrag (nach HUEGEL & GRAF 2007, S. 2)

Bei geringer Intensität der Laserstrahlung im Bereich von 10^3 bis 10^4 W/cm^2 wird nach HUEGEL & GRAF (2007) die Bearbeitungszone lediglich erwärmt (siehe Phänomen a). Ab Leistungsdichten von 10^5 W/cm^2 wird in der Wärmeeinflusszone die Schmelztemperatur erreicht oder überschritten, was zur Ausbildung eines Schmelzbades führt (Phänomen b). Mit eingestrahلتen Leistungsdichten von einigen 10^6 W/cm^2 kann die Verdampfungstemperatur erreicht werden.

Durch teilweises Verdampfen des Werkstoffs entsteht ein Rückstoßdruck, der eine in das Werkstück eindringende Dampfkapillare erzeugt, das sogenannte Keyhole (Phänomen c). Dabei wird die Absorption der Laserstrahlung aufgrund auftretender Mehrfachreflexionen innerhalb des Keyholes erhöht. Bei weiter ansteigenden Leistungsdichten wird die Verdampfungsrate gesteigert, was einen partiellen Materialabtrag zur Folge hat (Phänomen d).

Laserstrahl-Tiefschweißen

Im Bereich des Laserstrahlschweißens treten vornehmlich die Phänomene b) und c) auf. Wird der Werkstoff beim Fügen aufgeschmolzen, ohne dass Material verdampft, liegt ein Wärmeleitungsschweißen vor (DAUB 2012). Überwiegt Phänomen c), spricht man von einem Laserstrahl-Tiefschweißprozess (OEFLE 2012). Beim Laserstrahl-Tiefschweißen wird die Dampfkapillare durch die zu fügenden Bauteile geführt. Der durch das Keyhole entstehende Hohlraum im Werkstück ermöglicht ein tiefes Eindringen der Laserstrahlung, denn die eintreffende Laserstrahlung wird an den Kapillarwänden des Keyholes mehrfach reflektiert. Dies steigert im Vergleich zum Wärmeleitungsschweißen den Anteil an absorbierter Strahlung und erhöht die Effizienz des Schweißprozesses. Der Durchmesser des Keyholes liegt näherungsweise in der Größenordnung des Laserstrahldurchmessers im Fokus (WEBERPALS 2010).

Laserstrahlschweißen mit überlagerter Strahloszillation

Beim Laserstrahl-Tiefschweißen entstehen Schweißnähte mit einem großen Aspektverhältnis (Verhältnis von Schweißnahttiefe zu Schweißnahtbreite). Voraussetzung ist dabei eine brillante Strahlquelle, die nach OEFLE (2012) durch eine hohe Laserleistung ($3 \text{ kW} \leq P_L \leq 6 \text{ kW}$) und gleichzeitig hohe Strahlqualität ($M^2 < 24$) charakterisiert wird.

Werden breite Schweißnähte gefordert, kann der Laserstrahl mit beweglichen Spiegeln quer zur Schweißrichtung bewegt werden. Dabei wird die Vorschubgeschwindigkeit mit einer weiteren Bewegung überlagert. In diesem Zusammenhang spricht man von einer örtlichen Leistungsmodulation mittels überlagerter Strahloszillation. Das Schmelzbad und damit einhergehend die Schweißnahtbreite können durch die laterale Bewegung des Laserstrahls beeinflusst werden. Die einfachste Form der überlagerten Strahloszillation ist eine kreisförmige Bewegung des Laserstrahls, welche durch Radius und Frequenz charakterisiert wird. Die Schweißtrajektorie bei der kreisförmigen Strahloszillation lässt sich über Gleichung (2-6) mathematisch beschreiben (SCHWEIER ET AL. 2011). Es gilt:

$$\vec{p}_{circ}(t) = \begin{bmatrix} x_{circ}(t) \\ y_{circ}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_L \cdot t + r_{OSZ} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \\ r_{OSZ} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

mit

\vec{p}_{circ} : Schweißtrajektorie bei kreisförmig überlagerter Strahloszillation

r_{OSZ} : Radius der Strahloszillation

f : Frequenz der Strahloszillation

Abbildung 2-9 dokumentiert den Unterschied von zwei Schweißnähten einer Überlappverbindung, welche ohne überlagerte Strahloszillation (a) und mit kreisförmig überlagerter Strahloszillation (b) gefügt wurde.

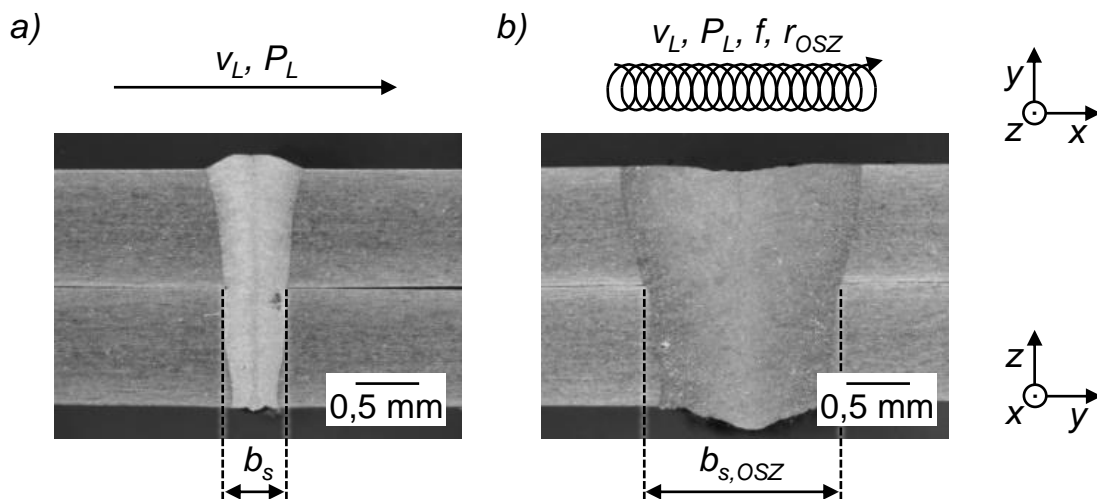


Abbildung 2-9: Querschliff einer Aluminium-Überlappverbindung mit Kennzeichnung der Schweißnahtbreite b_s : a) ohne überlagerte Strahloszillation ($P_L = 1650 \text{ W}$, $v_L = 6 \text{ m/min}$); b) mit kreisförmiger überlagerter Strahloszillation ($P_L = 1950 \text{ W}$, $v_L = 2 \text{ m/min}$, $f = 200 \text{ Hz}$, $r_{OSZ} = 0,25 \text{ mm}$)

2.3.4 Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

Das Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen wurde bereits ausführlich untersucht (RAPP 1996, KLASSEN ET AL. 1999, SCHINZEL 2002, CAO ET AL. 2003, MEIER 2006, KRONTHALER ET AL. 2011). Herausforderungen stellen dabei die physikalischen Eigenschaften, wie die geringe Oberflächenabsorption und die hohe Wärmeleitfähigkeit von Aluminium, dar (vgl. **Tabelle 2-3**). Die geringe Oberflächenabsorption von Laserstrahlung mit einer Wellenlänge im Bereich von

Tabelle 2-3: *Physikalische Eigenschaften von reinem Aluminium bei Raumtemperatur (SCHINZEL 2002, HESSE 2011)*

| Physikalische Eigenschaften von Aluminium | |
|--|---------------------------|
| Absorptionsgrad ($\lambda_{Nd} = 1064 \text{ nm}$ und senkrechte Einstrahlung) | 11% |
| Dichte ρ | 2,7 g/cm ³ |
| Wärmeleitfähigkeit λ | 221 W/(K·m) |
| Wärmeausdehnungskoeffizient α | 23,5·10 ⁻⁶ 1/K |
| Spezifische Wärmekapazität c_p | 896 J/(kg·K) |
| Schmelztemperatur T_s | 660 °C |

1000 nm führt nach SCHINZEL (2002) zu einem Absorptionsgrad von lediglich 11% und einer damit verbundenen hohen Reflexion der restlichen Strahlung. Der Werkstoff leitet die eingebrachte Energie aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit schnell aus der Wärmeeinflusszone heraus und es entsteht ein breites Schmelzbad. Zur Ausbildung und Aufrechterhaltung eines Tiefschweißprozesses muss deshalb lokal sehr viel Energie in das Werkstück eingebracht werden. Falls der Tiefschweißprozess nicht aufrecht erhalten werden kann, kollabiert das Keyhole. Dies verursacht die Bildung von Schweißspritzern und Schmelzbadauswürfen, welche Oberflächendefekte oder Poren hervorrufen können. Dies führt zur Verringerung der Schweißnahtqualität. Methoden zur Verbesserung der Schweißnahtqualität werden in Abschnitt 3.2.1 zum Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben.

Aluminium hat eine hohe Affinität zu dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff. Dieser führt ohne Vorhandensein eines Schutzgases zur Oxidschichtbildung während des Schweißprozesses. Diese vorzeitige Neubildung der Oxidschicht beeinträchtigt den Schweißprozess und die Nahtoberraupenqualität. Mit Hilfe von inerten Schutzgasen wie Helium oder Argon können demgegenüber erhebliche Qualitätsverbesserungen erlangt werden (SCHINZEL 2002).

2.3.5 Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoffen

Auch beim Laserstrahlschweißen von Kupfer stellen die geringe Absorption sowie die hohe Wärmeleitfähigkeit dieses Werkstoffs eine große Herausforderung dar. Für die Lasermaterialbearbeitung mit Wellenlängen im Bereich von 1000 nm

weist Kupfer eine Absorption der Laserstrahlung von weniger als 5% auf (BLOM ET AL. 2003). Zudem beträgt die Wärmeleitfähigkeit 394 W/(K·m) (Stahl hat nach SCHINZEL (2002) eine Wärmeleitfähigkeit von circa 50 W/(K·m)). Die physikalischen Eigenschaften von Kupfer sind in **Tabelle 2-4** dokumentiert.

Tabelle 2-4: Physikalische Eigenschaften von reinem Kupfer bei Raumtemperatur (GEDICKE 2011, HERRMANN 2011, HESS 2012)

| Physikalische Eigenschaften von Kupfer | |
|---|----------------------------------|
| Absorptionsgrad ($\lambda_{Nd} = 1064 \text{ nm}$ und senkrechter Einstrahlung) | < 5% |
| Dichte ρ | 8,9 g/cm ³ |
| Wärmeleitfähigkeit λ | 394 W/(K·m) |
| Wärmeausdehnungskoeffizient α | $17,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ |
| Spezifische Wärmekapazität c_p | 385 J/(kg·K) |
| Schmelztemperatur T_s | 1083 °C |

Folglich erfordert das Laserstrahl-Tiefschweißen von Kupfer, ähnlich wie bei den Aluminiumwerkstoffen, sehr hohe Leistungsdichten. Diese beschriebenen Eigenschaften von Kupfer beim Laserstrahlschweißen führen häufig zu Prozessinstabilitäten, welche in der Bildung von Schweißspritzern und Poren resultieren (HEIDER ET AL. 2011, HESS 2012). Strategien zu Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen von hochreinem Kupfer werden in Abschnitt 3.2.2 des Kapitels zum Stand der Wissenschaft und Technik dargestellt.

Enthalten Kupferwerkstoffe Sauerstoff, liegt dieser gebunden in Form von Cu₂O vor. Beim Abkühlen einer Kupferschmelze wird das Cu₂O bei der Rekristallisation umverteilt und lagert sich an den Korngrenzen ab. Dies führt zu spröden Phasensäumen und wirkt sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften aus. Bei der Auswahl von Kupfersorten für die Anwendung in stromführenden Bauteilen sind daher desoxidierte hochreine Kupferwerkstoffe zu bevorzugen. (SCHULZE 2010, HERRMANN 2011)

2.3.6 Laserstrahlschweißen von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen

Das Laserstrahlschweißen von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen stellt eine sehr komplexe Fügeaufgabe dar. Ursache hierfür sind Unterschiede der physikalischen Eigenschaften der beiden Metalle bezüglich der Schmelztemperatur, der thermischen Ausdehnung und der Wärmeleitfähigkeit, vgl. **Tabelle 2-3** und **Tabelle 2-4**. Aufgrund der mangelnden metallurgischen Affinität von Aluminium und Kupfer ist die gegenseitige Löslichkeit sehr gering (WEIGL ET AL. 2010B). Wird die Löslichkeitsgrenze durch einen entsprechenden Anteil an Aluminium bzw. Kupfer in der Schmelze überschritten, bilden sich intermetallische Phasen des Zweistoff-Systems aus (BRAUNOVIC & ALEXANDROV 1994). Diese Gefügebestandteile in Abhängigkeit des Kupferanteils und der Temperatur können dem Zustandsdiagramm von Aluminium und Kupfer in **Abbildung 2-10** entnommen werden.

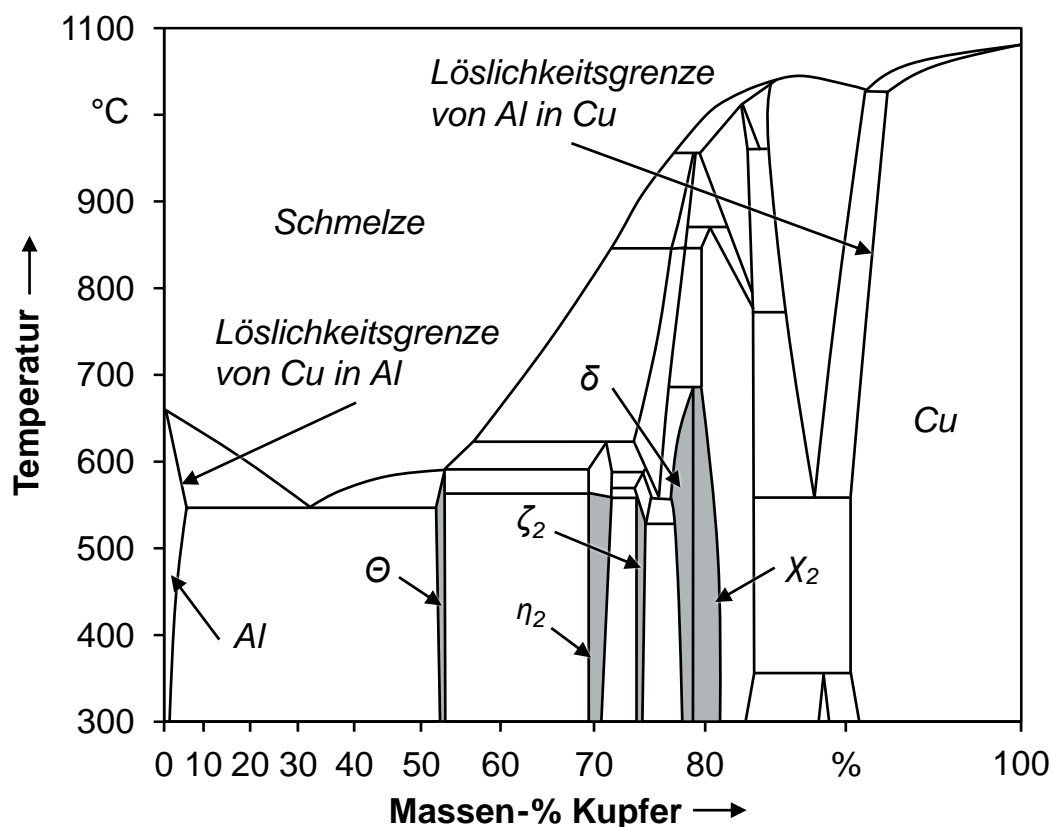


Abbildung 2-10: Zustandsdiagramm des binären Systems aus Aluminium und Kupfer und Kennzeichnung ausgewählter intermetallischer Phasen (nach BRANDES ET AL. 1998, S. 412)

Die auftretenden intermetallischen Phasen sind hart und spröde und sie weisen gegenüber den reinen Elementen eine stark verminderte elektrische Leitfähigkeit auf. **Tabelle 2-5** fasst die physikalischen Eigenschaften ausgewählter intermetallischer Phasen zusammen. Aufgrund einer Vickers-Härte von über 400 HV beeinträchtigen die Phasen Cu_4Al_3 , CuAl und CuAl_2 in besonderem Maße die mechanischen Eigenschaften der Mischverbindung (RAYNE ET AL. 1980).

Tabelle 2-5: Charakterisierung ausgewählter intermetallischen Phasen der Aluminium-Kupfer-Mischverbindung (RAYNE ET AL. 1980, S.383 und BRAUNOVIC & ALEXANDROV 1994, S. 27)

| Phase | Chemische Verbindung | Härte in HV | Spezifischer elektrischer Widerstand in $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ |
|--------------|-----------------------------|--------------------|---|
| Cu | Cu | 42 | 2,0 |
| χ_2 | Cu_2Al | 35 | 14,2 |
| δ | Cu_3Al_2 | 180 | 13,4 |
| ζ_2 | Cu_4Al_3 | 624 | 12,2 |
| η_2 | CuAl | 648 | 11,4 |
| Θ | CuAl_2 | 413 | 8,0 |
| Al | Al | 38 | 2,4 |

Der bereits erwähnte Unterschied der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kupfer ($17,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) und Aluminium ($23,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) erschwert zusätzlich das Schmelzschiessen dieser Werkstoffe. Bereits beim Erstarren der Aluminium-Kupfer-Schmelze treten thermisch induzierte Spannungen auf, die zur Rissbildung in der Schweißnaht führen können. Eine Aluminium-Kupfer-Mischverbindung mit auftretenden Schweißnahtfehlern wie Rissen oder Poren ist in **Abbildung 2-11 a)** dokumentiert.

Daher gilt es, diese intermetallischen Phasen beim Laserstrahlschweißen grundsätzlich zu vermeiden bzw. auf ein Minimum zu reduzieren, um technisch nutzbare Fügeverbindungen herstellen zu können. Nach JONES (1982) korreliert die Festigkeit der Fügeverbindung mit der Saumbreite der auftretenden intermetallischen Phasen. In **Abbildung 2-11 b)** werden beispielhaft die Phasensäume der Phasen $\text{Al-Al}_2\text{Cu}$ und Al_2Cu veranschaulicht. Erst bei Phasensaumbreiten von weniger als $1 \mu\text{m}$ kann der Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit vernachlässigt werden. Dies einzuhalten gelingt jedoch nur mithilfe von Methoden mit erheblichem Zusatzaufwand, welche in Abschnitt 3.2 zu den Methoden zur Vermeidung intermetallischer Phasen ausführlich diskutiert werden.

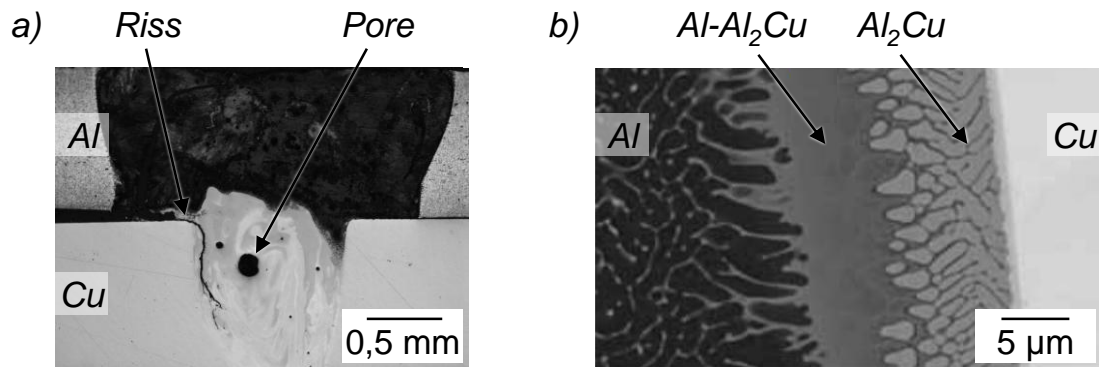


Abbildung 2-11: Laserstrahlgeschweißte Aluminium-Kupfer-Mischverbindung mit a) thermisch induziertem Riss sowie Schweißporen; ($P_L = 1350 \text{ W}$, $v_L = 2 \text{ m/min}$, $f = 200 \text{ Hz}$, $r_{OSZ} = 0,25 \text{ mm}$) und b) Aufnahme der Phasensäume $\text{Al-Al}_2\text{Cu}$ und Al_2Cu in der Grenzfläche einer Aluminium-Kupfer-Mischverbindung (nach KRAETSCH ET AL. 2011, S. 175)

2.3.7 Vor- und Nachteile bei der elektrischen Kontaktierung mittels Laserstrahlschweißen

Vorteile

Laserstrahlschweißen bietet bei der elektrischen Kontaktierung zahlreiche Vorteile gegenüber konventionellen Fügeverfahren, wie beispielsweise dem Schrauben.

Tabelle 2-6 fasst die zentralen Vorteile in einer Übersicht zusammen. Bei der Fertigung ist ein Prozess mit hoher Automatisierbarkeit umsetzbar. In besonderem Maße ist die hohe Prozessgeschwindigkeit und Reproduzierbarkeit ohne den Einsatz von Zusatzelementen, wie Zusatzdraht oder Hilfsfügeteile, hervorzuheben (OEFELE 2012, S. 155-156). Die Arbeitssicherheit im Umfeld von Spannung führenden Bauteilen kann durch einen berührungslosen Fügeprozess gewährleistet werden (LEE ET AL. 2010, S. 4). Die elektrischen Eigenschaften der Kontakte sind aufgrund der stoffschlüssigen Fügeverbindung (vgl. Abschnitt 2.4.3) bei gleichzeitig hoher Flexibilität bei der Gestaltung der Kontaktgeometrie sowie der Anbindungsfläche ebenfalls positiv zu erwähnen.

Tabelle 2-6: Vorteile bei der elektrischen Kontaktierung mittels Laserstrahlschweißen gegenüber dem Fügeverfahren Schrauben

| Vorteile | |
|----------------------------------|--|
| Prozessdurchführung | <ul style="list-style-type: none"> • hohe Automatisierbarkeit • hohe Prozessgeschwindigkeit • hohe Reproduzierbarkeit • keine Zusatzwerkstoffe |
| Arbeits-sicherheit | <ul style="list-style-type: none"> • Berührungslose Fügeaufgabe • keine Kurzschlussgefahr durch Zusatzelemente (Muttern) oder Werkzeuge (Schraubenschlüssel) |
| Eigenschaften der Fügeverbindung | <ul style="list-style-type: none"> • Stoffschluss • weitgehend beliebige Kontaktgeometrie • flexible Gestaltung der Anbindungsfläche |

Nachteile

Ein Überblick der Nachteile beim Kontaktieren mittels Laserstrahlschweißen ist in **Tabelle 2-7** dokumentiert. Herausforderungen treten beim Laserstrahlschweißen durch die eingebrachte thermische Belastung auf (PAULESER & SCHMIDT 2014).

Tabelle 2-7: Nachteile bei der elektrischen Kontaktierung mittels Laserstrahlschweißen gegenüber dem Fügeverfahren Schrauben

| Nachteile | |
|---------------------|---|
| Prozessdurchführung | <ul style="list-style-type: none"> • Gefahr der Zellschädigung durch thermische Belastung • Mischverbindungen nur mit erheblichem Zusatzaufwand möglich • keine lösbare Verbindung, aufwendiges Reparaturkonzept |
| Arbeitssicherheit | <ul style="list-style-type: none"> • Aufwand für das Gewährleisten der Lasersicherheit • Fachpersonal notwendig |
| Kosten | <ul style="list-style-type: none"> • hohe Investitionskosten |

Sowohl thermische Verzüge als auch die Schädigung von temperaturempfindlichen Komponenten können Zusatzaufwand in der Prozessführung und der Gestaltung der Kontaktgeometrie mit sich bringen. Wie bereits in Abschnitt 2.3.6 beschrieben, sind beim Fügen von Mischverbindungen besondere Problemstellungen zu beachten, um technisch funktionsfähige Kontakte herzustellen. Zudem ist eine geschweißte Kontaktstelle nicht lösbar. Dies kann sich nachteilig auf die Konzepte für eine Nacharbeit bzw. eine Reparatur des Kontakts auswirken. Beim Einsatz von Laserstrahlquellen mit hoher Leistung sind die Rahmenbedingungen der Lasersicherheit zu beachten (BRAUNREUTHER 2014). Dabei treten je nach Anwendungsfall beachtliche Kosten bei der Umsetzung auf. Der Einsatz der Lasermaterialbearbeitung verlangt im Vergleich zu konventionellen Fügeverfahren hohe Investitionskosten für die Laserstrahlquelle, welche jedoch bei der Fertigung von Serienbauteilen gerechtfertigt sein können (OEFELE 2012, S. 157-158).

2.4 Elektrischer Widerstand von Kontakten

2.4.1 Allgemeines

Die folgenden Abschnitte fassen die für diese Arbeit relevanten elektrotechnischen Grundlagen zusammen und basieren auf grundlegender Fachliteratur, auf die für weiterführende Erklärungen verwiesen wird (HOLM 1941, SCHRUEFER 1990, VINARICKY 2002, BRAUNOVIC ET AL. 2007). Auch wenn das stoffschlüssige Fügeverfahren Laserstrahlschweißen im Zentrum dieser Arbeit steht, werden Grundlagen zu kraftschlüssigen Kontakten ergänzend betrachtet. Damit kann das Verfahren Laserstrahlschweißen zu weiteren Fügeverfahren abgegrenzt werden.

2.4.2 Kraftschlüssige Kontakte

Werden zwei metallische Kontaktelemente kraftschlüssig verbunden, kann eine elektrische Verbindung hergestellt werden. Als Fügeverfahren hierfür dienen u. a. Schrauben, Clinchen (Durchsetzfügen) oder Stecken. Die Berührungsfläche zwischen den Leitern wird als scheinbare Kontaktfläche A_s bezeichnet. Durch die Oberflächenrauigkeit der Kontaktelemente wird die aufgebrachte Kontaktkraft lediglich über mikroskopisch kleine Kontaktflächen übertragen. Die sogenannte tragende Kontaktfläche A_t fasst die Summe aller mikroskopischen Kontaktflächen zusammen. Der elektrische Strom fließt aufgrund von Fremdschichten oder Verunreinigungen auf den Werkstoffoberflächen durch eine noch weiter vermin-

derte Kontaktfläche, welche als wirkende Kontaktfläche A_w bezeichnet wird. Die Kontaktfläche A_w ist um ein Vielfaches kleiner als die scheinbare Kontaktfläche A_s ($A_w \ll A_s$). (VINARICKY 2002, S. 2 f.)

In **Abbildung 2-12** wird exemplarisch ein kraftschlüssiger Kontakt zwischen einem Terminal einer Lithium-Ionen-Zelle und einem Zellverbinder dargestellt.

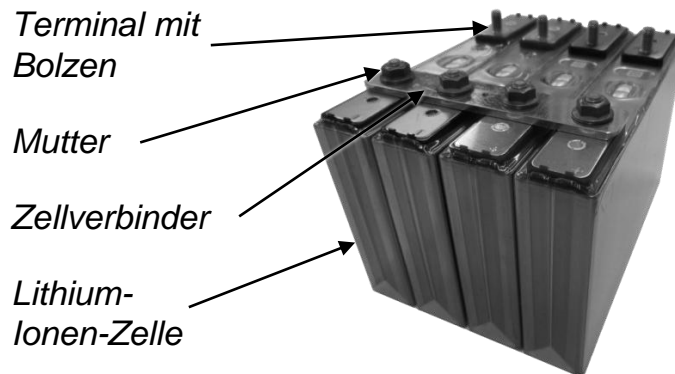


Abbildung 2-12: Durch Schrauben kontaktierte Lithium-Ionen-Batterien (nach PAULESER & SCHMIDT 2014)

Abbildung 2-13 zeigt einen Querschnitt durch diese geschraubte Verbindung mit den beschriebenen Kontaktflächen. Die tragende und die projizierte Kontaktfläche werden schematisch veranschaulicht. Der elektrische Strom wird an den Mikroflächen der scheinbaren Kontaktfläche eingeschnürt. Dies führt zu einem elektrischen Widerstand, welcher Engewiderstand R_E genannt wird. Findet ein Stromfluss durch die Fremdschichten der tragenden Kontaktfläche statt, ist der Fremdschichtwiderstand R_F als weiterer Widerstand in der Verbindung zu berücksichtigen.

Der Verbindungswiderstand R_X eines kraftschlüssigen Kontaktes berechnet sich damit nach Gleichung (2-7) aus dem Materialwiderstand der Kontaktelemente R_M , dem Engewiderstand R_E sowie dem Fremdschichtwiderstand R_F (VINARICKY 2002, S. 3). Die Summe aus Engewiderstand R_E und Fremdschichtwiderstand R_F wird als Kontaktwiderstand R_K bezeichnet. Es gilt:

$$R_X = R_M + R_E + R_F \quad (2-7)$$

mit

- R_X : Verbindungswiderstand
- R_M : Materialwiderstand der Kontaktelemente
- R_E : Engewiderstand
- R_F : Fremdschichtwiderstand

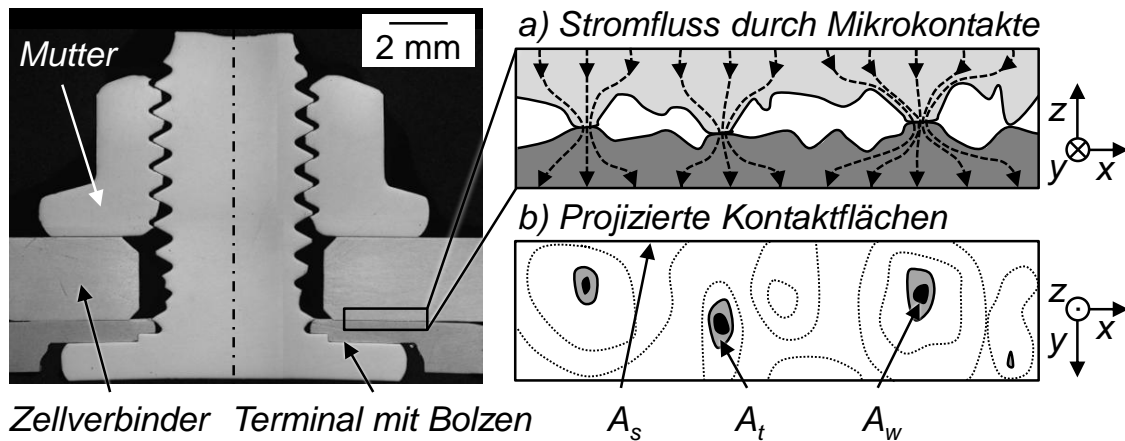


Abbildung 2-13: Querschliff durch einen geschraubten Kontakt (eigene Darstellung); Prinzipdarstellung der a) tragenden Kontaktfläche und b) projizierten Kontaktfläche mit Angabe der scheinbaren Kontaktfläche A_s , der tragenden Kontaktfläche A_t und der wirksamen Kontaktfläche A_w nach VINARICKY (2002, S. 2)

Der Materialwiderstand R_M der Kontaktelemente lässt sich vereinfacht mit Gleichung (2-8) berechnen. Diese gilt für die Widerstandsberechnung bei homogenem Stromlinienverlauf eines Leiters mit dem spezifischen Materialwiderstand ρ , der Länge l und einem Leiterquerschnitt A_L :

$$R_M = \rho \cdot \frac{l}{A_L} \quad (2-8)$$

mit

- ρ : spezifischer Materialwiderstand
- l : Länge des Kontaktelements
- A_L : Leiterquerschnitt

Der elektrische Widerstand kraftschlüssiger Kontakte ist in besonderem Maße von der aufgebrachten Kontaktkraft abhängig. Je höher die Kontaktkraft ist, desto größer bildet sich die wirksame Kontaktfläche aus, was den elektrischen Widerstand verringert (VINARICKY 2002, S. 7). Werden die Kontaktflächen vor der Montage gereinigt und werden Fremdschichten wie beispielsweise Oxidschichten entfernt, können elektrische Verluste an kraftschlüssigen Verbindungen reduziert werden. Die Langzeitstabilität solcher elektrischer Kontakte kann durch ein Abfallen der Kontaktkraft oder durch die Bildung von Fremdschichten innerhalb des Kontaktes gefährdet werden (BRAUNOVIC 2007). Detaillierte Arbeiten zum Langzeitverhalten sowie zu den elektrischen Eigenschaften von geschraubten

Hochstromkontakten wurden von (SCHOFT ET AL. 2001, BRAUNOVIC ET AL. 2007, SCHNEIDER ET AL. 2009) und (SCHLEGEL 2011) veröffentlicht.

2.4.3 Stoffschlüssige Kontakte

Elektrische Kontakte, welche durch stoffschlüssige Fügeverfahren hergestellt werden, bieten hinsichtlich der elektrischen Widerstände entscheidende Vorteile. Im Gegensatz zu kraftschlüssigen Kontakten, die den Strom ausschließlich durch Mikrokontakte übertragen, kann der Strom hier ohne signifikante Einschnürung fließen. Das bedeutet, dass der Engwiderstand R_E minimiert wird und demnach fast keinen Beitrag zum Verbindungswiderstand R_X leistet. Schmelzschweißverfahren, Pressschweißverfahren, Löten sowie elektrisch leitfähiges Kleben sind gebräuchliche Fügeverfahren zur stoffschlüssigen Kontaktierung. Für Löt- und Klebeverbindungen stellt sich jedoch ein zusätzlicher Widerstand aufgrund eines zusätzlichen Werkstoffs zwischen den Kontaktelementen ein. Dies ist bei geschweißten Verbindungen nicht der Fall. Zudem kann der Einfluss von Fremdschichten bei Schweißverbindungen vernachlässigt werden. Somit tritt kein oder ein nur sehr geringer Kontaktwiderstand R_K auf. Der Materialwiderstand der Schweißnaht ist nach BRAUNOVIC ET AL. (2007) vergleichbar mit dem Leiterwiderstand. Dies führt zu zuverlässigen und langzeitstabilen elektrischen Verbindungen. **Abbildung 2-14** dokumentiert den Stromfluss durch einen geschweißten Kontakt mit homogener Stromlinienverteilung innerhalb der Schweißnaht.

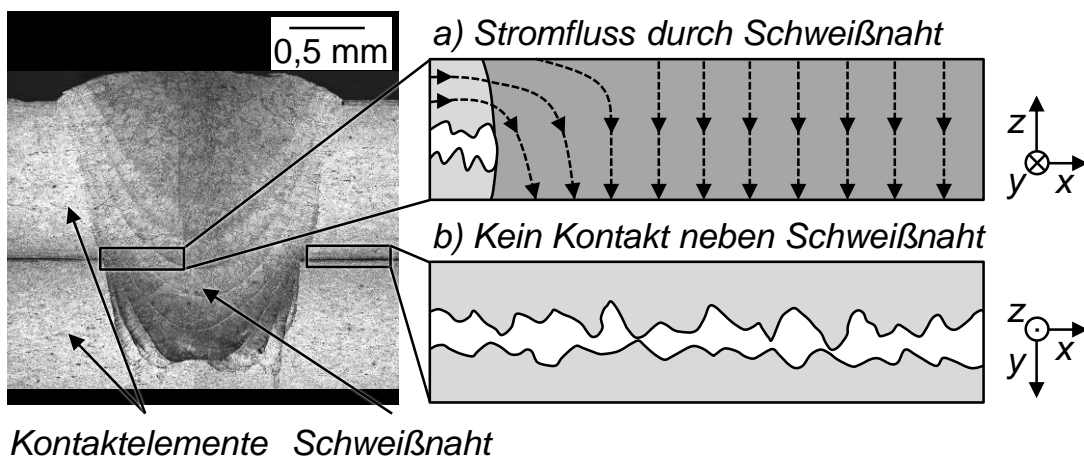


Abbildung 2-14: Querschliff durch einen laserstrahlgeschweißten elektrischen Kontakt (eigene Darstellung); a) Stromfluss (qualitativ) durch die Schweißnaht und b) kein Kontakt neben der Schweißnaht

Neben der Schweißnaht findet aufgrund von Fremdschichten oder mangelnder Kontaktkraft kein bzw. ein zu vernachlässigender Stromfluss statt. (BRAUNOVIC ET AL. 2007, S. 291 f.)

2.4.4 Vier-Leiter-Widerstandsmessung

Bei der elektrischen Kontaktierung treten aufgrund der geringen spezifischen Materialwiderstände der Werkstoffe Aluminium und Kupfer sehr kleine Widerstände auf (vgl. Abschnitt 2.2.5). Eine etablierte Methode zur hochgenauen Bestimmung dieser Widerstände ist die Vier-Leiter-Messmethode. Dabei wird ein definierter Prüfstrom I_0 durch das zu messende Bauteil mit dem Verbindungswiderstand R_X geleitet. Mittels eines Voltmeters kann der Spannungsabfall über dem Widerstand ermittelt werden. Mit Hilfe des Ohm'schen Gesetzes lässt sich anschließend der Widerstand berechnen. (SCHRUEFER 1990, S. 221-223)

Vorteil dieser Messmethode ist die Trennung von Stromquelle und Voltmeter anhand von vier Leitungen. Widerstände der Stromleitungen $R_{L,S}$ sind in Reihe mit dem gesuchten Verbindungswiderstand R_X geschaltet und wirken dadurch bei der Spannungsmessung nicht verfälschend auf das Ergebnis. Leitungswiderstände der Messleitungen $R_{L,M}$ verursachen jedoch einen systematischen Messfehler. Durch eine Parallelschaltung des Verbindungswiderstands R_X und des Voltmeters teilt sich der Prüfstrom I_0 im Verhältnis von R_X und dem Innenwiderstand R_I des Voltmeters auf. Wird ein Voltmeter mit sehr hohem Innenwiderstand gewählt ($R_I \rightarrow \infty$), kann der Anteil des verfälschenden Prüfstroms I_M vernachlässigt werden ($I_M \rightarrow 0$) (PARTHIER 2010, S. 102). Das bedeutet, dass die gemessene Spannung U_M dem Spannungsabfall über dem Verbindungswiderstand U_X entspricht ($U_M = U_X$). Entsprechende Voltmeter haben einen Innenwiderstand von einigen Mega-Ohm ($10^6 \Omega$), wohingegen die hier betrachteten Verbindungswiderstände in Größenordnungen von 10^{-5} bis $10^{-6} \Omega$ liegen. Damit ergeben sich in den Messleitungen Ströme von 10^{-11} bis 10^{-12} A. Diese Ströme sind messtechnisch nicht sinnvoll erfassbar und haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Messergebnis. **Abbildung 2-15** dokumentiert das beschriebene Prinzip der Vier-Leiter-Widerstandsmessung.

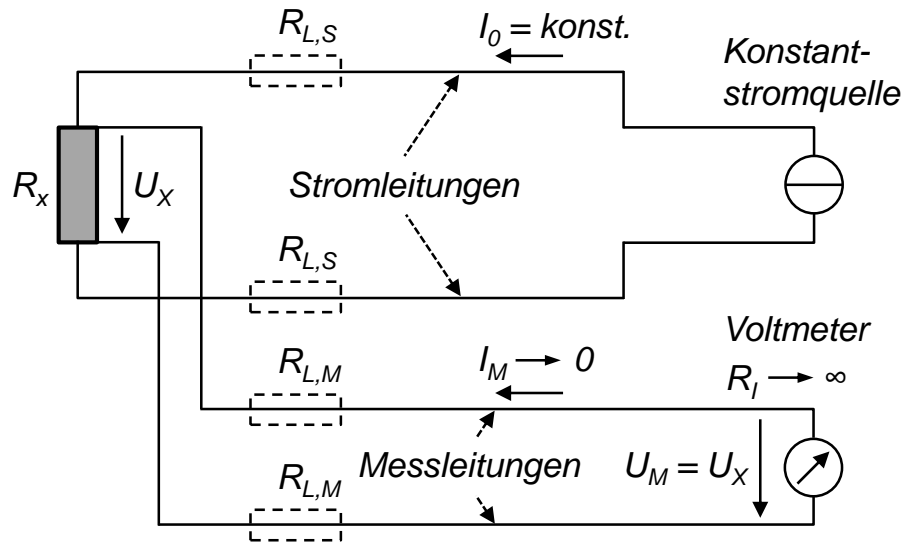


Abbildung 2-15: Prinzip der Vier-Leiter-Widerstandsmessung zur Bestimmung des Verbindungswiderstands R_X (nach PARTHIER 2010, S. 103)

Die Berechnung des Verbindungswiderstandes R_X mittels der Vier-Leiter-Widerstandsmessung ist in Gleichung (2-9) beschrieben. Es gilt:

$$R_X = \frac{I_0}{U_M} = \frac{I_0}{U_X} \quad (2-9)$$

mit

- R_X : Verbindungswiderstand
- U_M : Messspannung
- U_X : Spannungsabfall über dem Verbindungswiderstand R_X
- I_0 : Prüfstrom

Um einen weiteren systematischen Messfehler zu vermeiden, ist zudem darauf zu achten, dass der Widerstand bei einer konstanten Temperatur gemessen wird. Bis zu einer Temperatur von ca. 120 °C besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Widerstand der Metalle. Dieser wird durch Gleichung (2-10) beschrieben (PLASSMANN & SCHULZ 2009, S. 255):

$$R_\vartheta = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad (2-10)$$

mit

- R_ϑ : Widerstand bei der Temperaturänderung $\Delta\vartheta$
- R_0 : Widerstand bei Umgebungstemperatur
- α : materialspezifischer Temperaturbeiwert
- $\Delta\vartheta$: Temperaturänderung

2.5 Optimierung mittels evolutionärer Algorithmen

2.5.1 Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen sind stochastische Suchverfahren, die Prinzipien der natürlichen biologischen Evolution abbilden. Durch diese Algorithmen können (lokal) optimale Lösungen ohne Vorwissen über die Problemstellung gefunden werden. Sie sind universell einsetzbar und einzelnen Lösungen oder Zwischenergebnissen muss lediglich eine Ergebnisqualität zugeordnet werden. Als Grundprinzip wird dabei die stochastische Erkundung eines Suchraumes verwendet. Der Algorithmus trägt einen Wettbewerb zwischen einer Anzahl potentieller Lösungen aus, der an die natürliche Auslese der Evolution angelehnt ist. Die Anzahl der Lösungen wird dabei als *Population* und die einzelne Lösung als *Individuum* bezeichnet. Neue Lösungen werden mittels *Rekombination* und *Mutation* von Individuen generiert. Durch eine Bewertung der Lösungen im Sinne einer Zielfunktion können einzelne Lösungen *selektiert* und der nächsten *Generation* zugeführt werden. Dieser Prozess wird ausgeführt, bis ein vordefiniertes Abbruchkriterium erfüllt ist. (KRAMER 2009, S. 13)

2.5.2 Genetischer Algorithmus

Die Grundform evolutionärer Algorithmen stellt der genetische Algorithmus (kurz GA) dar. Dieser wurde in den 1970er Jahren von John Holland entworfen und dokumentiert (HOLLAND 1975). Sein Ziel war es, ein adaptives Verhalten des Algorithmus zu erreichen. Dabei werden die Informationen der Individuen in binären Zeichenketten (Strings) kodiert. Sie setzen sich aus mehreren Segmenten zusammen (KRAMER 2009, S. 18). Der Ablauf des genetischen Algorithmus ist in **Abbildung 2-16** veranschaulicht.

Initialisierung

In einem ersten Schritt wird eine *Anfangspopulation* generiert (*Initialisierung*). Dabei werden innerhalb eines Suchraums zufällige Lösungen erstellt. Im darauffolgenden Schritt wird eine vordefinierte Zielfunktion berechnet und es wird jeder Lösung eine Ergebnisqualität, eine *Fitness*, zugewiesen. Dies geschieht mittels einer *Fitnessfunktion*, welche die Fortpflanzungswahrscheinlichkeit der einzelnen Individuen innerhalb ihrer Population festlegt. Für die in dieser Arbeit untersuchte Problemstellung wird eine *reihenfolgenbasierte Fitnessfunktion*, das

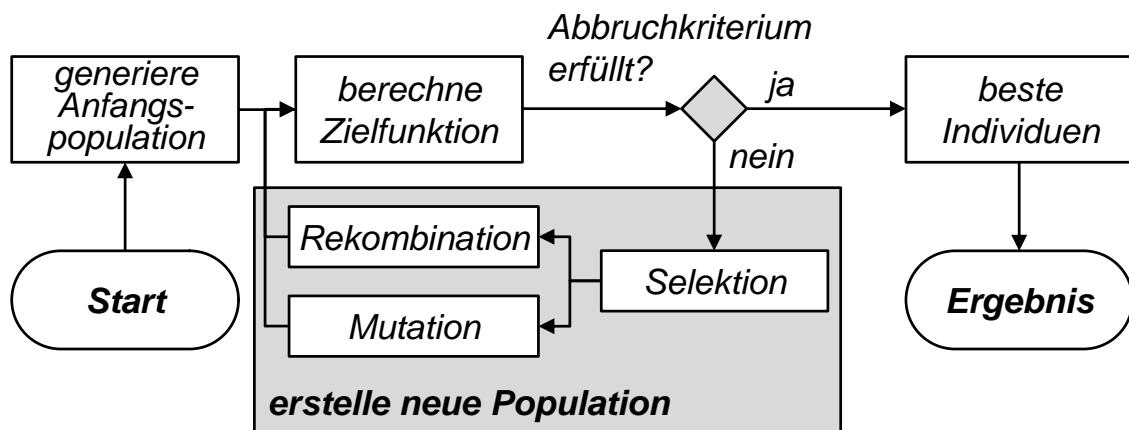


Abbildung 2-16: Ablauf der Grundform des genetischen Algorithmus (nach POHLHEIM 1999, S. 9)

sogenannte *ranking*, verwendet (POHLHEIM 1999, S. 17). Die Individuen einer Population werden anhand des errechneten Zielfunktionswerts sortiert. Dem Individuum mit dem besten Zielfunktionswert wird der höchste Rang, dem mit dem schlechtesten Zielfunktionswert der Rang 1 zugewiesen. Der Rang entspricht in diesem Fall dem *Fitnesswert* des Individuums. Dadurch wird die Fitness der Individuen vom Zielfunktionswert entkoppelt und es liegt eine gleichmäßige Skalierung aller Fitnesswerte innerhalb einer Population vor. Dies ist nach POHLHEIM (1999, S. 17) dann vorteilhaft, wenn die Zielfunktionswerte mehrerer Individuen keine signifikanten Unterschiede aufweisen und es zu einer vorzeitigen Konvergenz der Zielfunktion ohne Ermittlung des globalen Optimums kommt.

Selektion und Reproduktion

Anschließend folgt der Schritt der Auswahl (Selektion) und Neuerzeugung (Reproduktion) von Individuen. Für die Auswahl von Individuen gibt es zahlreiche Selektionsverfahren, welche in (POHLHEIM 1999, SIVANANDAM & DEEPA 2008, KRUSE ET AL. 2011) ausführlich beschrieben werden und je nach Anwendungsfall Vor- oder Nachteile aufweisen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden der *Elitismus* als Teilschritt der Selektion und die *Turnierselektion* nach KRUSE ET AL. (2011, S. 181) implementiert.

Beim Elitismus werden n_E Individuen mit den höchsten Rängen ausgewählt und direkt in die nächste Generation übernommen, sodass sich die Ergebnisse im Verlauf der Optimierung nicht verschlechtern können. Bei der Turnierselektion wird zunächst aus der gesamten Population eine definierte Anzahl an Individuen, die sogenannten Turnierteilnehmer n_t , zufällig ausgewählt. Diese Individuen tre-

ten nun in einem Turnier gegeneinander an, wobei das Individuum mit dem höheren Rang gewinnt und somit ausgewählt wird. Die Gewinner stehen bei der nächsten Auswahl an Individuen erneut zur Verfügung. Der Selektionsdruck kann bei diesem Verfahren über die Anzahl der Individuen, die an einem Turnier teilnehmen, also über die Turniergröße, gesteuert werden. Für den Fall, dass nur ein Individuum am Turnier teilnimmt, liegt kein Selektionsdruck vor. Das entsprechende Individuum wird unabhängig von seinem Fitnesswert direkt ausgewählt. Falls alle Individuen an einem Turnier teilnehmen, gewinnt immer das Individuum mit dem besten Fitnesswert der gesamten Population. Die Auswahl von Individuen mit niedrigem Rang ist damit ausgeschlossen, sodass der Selektionsdruck maximal ist. Dieser Selektionsvorgang wird so oft wiederholt, bis die benötigte Anzahl an Individuen für den folgenden Schritt der *Reproduktion* durch *Rekombination* und *Mutation* erreicht ist.

Bei der Rekombination werden aus den Eltern die Nachkommen für eine neue Generation erzeugt. Zur Umsetzung der Rekombination stehen in der Literatur ebenfalls eine Vielzahl an Varianten zur Verfügung (POHLHEIM 1999, KRUSE ET AL. 2011). Zur Lösung der Problemstellungen der vorliegenden Arbeit wird die Variante der *diskreten Rekombination* nach POHLHEIM (1999, S. 35) verwendet. Die Variablen zweier Elternindividuen werden zufällig ausgetauscht. Für jede Variable wird dabei ebenfalls zufällig entschieden, von welchem Elter der Variablenwert ausgewählt wird. Bei der diskreten Rekombination können so Nachkommen auf den Eckpunkten eines Hyperwürfels, eines n-dimensionalen Würfels, der von den Werten der Elternvariablen aufgespannt wird, erzeugt werden. Das Schema der diskreten Rekombination wird in **Abbildung 2-17** am Beispiel von zwei Eltern gezeigt.



Abbildung 2-17: Schema der diskreten Kombination am Beispiel von zwei Eltern
(nach POHLHEIM 1999, S. 35)

Im Gegensatz zur Rekombination, welche die bestehende Information einer Population nutzt, hat die Mutation die Aufgabe, den Suchraum zu erkunden und die genetische Vielfalt einer Population zu erhalten (KRAMER 2009). Dafür werden die Merkmale von Individuen mit einer definierten Wahrscheinlichkeit verändert. Dies geschieht unter der Berücksichtigung von zwei wesentlichen Anforderungen:

- Von jedem beliebigen Punkt im Lösungsraum muss jeder andere Punkt des Lösungsraums durch die Mutation erreichbar sein.
- Die genetische Mutation muss sich in alle Richtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit bewegen. Erst durch die Selektion wird, basierend auf der Fitness von Individuen, eine Optimierungsrichtung vorgegeben.

KRAMER (2009, S. 21-25) nennt eine Reihe an Verfahren, um die Mutation durchzuführen. Für die hier vorliegende Arbeit wurde die *uniforme Mutation* implementiert. Dieses Verfahren variiert jede Variable eines Individuums mit der gleichen Wahrscheinlichkeit, sodass innerhalb des Suchraums neue Individuen durch die Kombination aus neuen und bereits vorhandenen Werten erzeugt werden können. Die Wahrscheinlichkeit, mit der die Variablen verändert werden, wird als Mutationsrate r_m bezeichnet. Sie soll nach POHLHEIM (1999, S. 47) zu $1/n_v$ gewählt werden. n_v ist dabei die Anzahl der Optimierungsvariablen eines Individuums. Bei dieser Mutationsrate wird pro Mutation eines Individuums im Durchschnitt lediglich eine Variable variiert. Die neuen Individuen, die Nachkommen, ersetzen anschließend die Individuen der Anfangspopulation und bilden eine neue Generation.

Abbruchkriterium

Wird ein *Abbruchkriterium* erfüllt, liegt das Ergebnis in Form der besten Individuen vor. Ist dies nicht der Fall, werden fortlaufend neue Generationen erzeugt. Mit Hilfe des Abbruchkriteriums wird zudem bestimmt, wann eine Optimierung endet. Dabei sind nach POHLHEIM (1999) zwei Kriterien zu erfüllen. Zum einen darf die Optimierung erst dann abbrechen, wenn ein ausreichend gutes Ergebnis, also eine deutliche Verbesserung des Zielfunktionswerts, vorliegt. Zum anderen sollen nur so viele Zielfunktionen berechnet werden, wie nötig sind, sodass die Rechenzeit nicht übermäßige Werte annimmt. Eine Möglichkeit besteht darin, den Konvergenzverlauf zu überwachen. Dies kann durch eine kontinuierliche Ausgabe des Zielfunktionswerts des besten Individuums nach jeder berechneten Generation erfolgen. Bei aufwändigeren Optimierungsvorgängen wird der Ab-

bruch der Optimierung basierend auf den konvergierten Zielfunktionswerten erzwungen. In diesem Fall ist vom Benutzer ein entsprechendes Abbruchkriterium zu definieren.

2.6 Zusammenfassung

In den vorherigen Abschnitten wurden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen zum Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte in Elektro- und Hybridfahrzeugen aufbereitet. Beginnend mit dem Aufbau von Batteriesystemen und Lithium-Ionen-Zellen wurden zu den Anforderungen an die elektrischen Kontakte übergeleitet. Zum Verständnis der Lasermaterialbearbeitung wurden sowohl die Grundzüge der Strahl-Stoff-Wechselwirkung als auch das Laserstrahl-Tiefschweißen der Werkstoffe Aluminium und Kupfer und von Aluminium-Kupfer-Mischverbindung dargelegt. Weitere Abschnitte dienten der grundlegenden Erläuterung zur Messung elektrischer Widerstände. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ein genetischer Algorithmus zur Optimierung und Auslegung von laserstrahlgeschweißten Kontakten verwendet. Daher wurden die Grundzüge der Optimierung mittels genetischer Algorithmen ebenfalls erläutert.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

3.1 Allgemeines

Wie bereits in Abschnitt 2.2 erläutert, erfordert der Aufbau eines Batteriesystems mit Lithium-Ionen-Zellen sowohl das artgleiche als auch das artverschiedene Verbinden (Mischverbindung) von Aluminium- und Kupfer-Werkstoffen. In den im Folgenden beschriebenen Arbeiten wurden, falls nicht anders gekennzeichnet, jeweils hochreine Aluminium- (EN AW-1050A, 99,5% Aluminium) und Kupferwerkstoffe (EN CW-004A bzw. EN CW-008A, 99,9% Kupfer) eingesetzt.

Grundsätzlich stellt das artgleiche Laserstrahlschweißen von Aluminium- und Kupfer-Werkstoffen deutliche Anforderungen an das Fügeverfahren, wie es bereits in den Abschnitten 2.3.4 und 2.3.5 aufgezeigt wurde. Beim artverschiedenen Schmelzschweißen von Aluminium mit Kupfer treten spröde intermetallische Phasen auf, die die Verbindungsqualität stark einschränken. Soll Laserstrahlschweißen zur elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen eingesetzt werden, muss dies berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 2.2.4). Daher wird in den Abschnitten 3.2 und 3.3 zunächst der Stand der Wissenschaft und Technik zum Laserstrahlschweißen von Aluminium- und Kupferverbindungen sowie von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen betrachtet. Letzteres wird ausführlich im Hinblick auf Methoden zur Vermeidung intermetallischer Phasen dargelegt.

Im Anschluss daran wird in Abschnitt 3.4 der Stand der Wissenschaft und Technik zur elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batterien erörtert. Zunächst werden in Abschnitt 3.4.1 Arbeiten präsentiert, welche generell hierfür geeignete Fügeverfahren zum Inhalt haben. Der Vergleich und die technologische Bewertung dieser Verfahren im Hinblick auf das Fügen der Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien war hier Gegenstand der Untersuchungen.

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht das Fügeverfahren Laserstrahlschweißen. Daher wird der Stand der Wissenschaft und Technik zum Kontaktieren von Lithium-Ionen-Batterien mittels Laserstrahlschweißen detailliert in Abschnitt 3.4.2 aufgeführt. Der Fokus der vorgestellten Arbeiten liegt auf der mechanischen und der elektrischen Charakterisierung der elektrischen Verbindungen. Abschließend wird in Abschnitt 3.5 eine Situationsanalyse durchgeführt, um den Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abzuleiten.

3.2 Artgleiches Laserstrahlschweißen von Aluminium und Kupfer

3.2.1 Laserstrahlschweißen von Aluminium

Für das Laserstrahlschweißen von technischen Aluminiumlegierungen liegt umfangreiche Literatur vor. In dieser Arbeit wird vor allem auf das Laserstrahlschweißen von hochreinem Aluminium für die Anwendung als Leiterwerkstoff eingegangen. Dies ist eine Spezialanwendung, zu welcher vergleichsweise wenig Literatur vorliegt. Wie bereits in Abschnitt 2.3.4 beschrieben, führen auch bei reinem Aluminium Schweißspritzer und Schmelzbadauswürfe aufgrund eines instabilen Schweißprozesses zu Einbußen in der Verbindungsqualität.

Eine Hauptursache für die Entstehung von Schmelzbadauswürfen ist nach MEIER (2006) der sogenannte Humping-Effekt. Bei diesem Phänomen führen Änderungen der Absorption der Laserstrahlung zu einem pulsierend-schwingenden Schmelzbad. Die Absorption der Laserstrahlung variiert aufgrund einer dynamisch wechselnden Keyholegeometrie und ungleichmäßiger Metaldampfströmungen (THOMY ET AL. 2006). Der Humping-Effekt verursacht neben Schmelzbadauswürfen auch Poren und eine ungleichmäßige Nahtoberraupe. Als Strategien zur Reduzierung dieses Effekts können eine Defokussierung der Laserstrahlung sowie die örtliche und zeitliche Modulation der Laserleistung angewendet werden (KLASSEN ET AL. 1999, MEIER 2006).

Eine weitere Möglichkeit zur Stabilisierung des Schweißprozesses bietet der Einsatz der Doppelfokustechnik. Der Laserstrahl wird dabei durch eine Festoptik aufgeteilt, sodass zwei Brennflecke entstehen. Diese werden vornehmlich hintereinander angeordnet, sodass ein in Vorschubrichtung längeres trichterförmiges Keyhole erzeugt wird. Dieses begünstigt die Schmelzbadströmung und ein gleichmäßiges Entweichen des Metaldampfes. (KLASSEN ET AL. 1999)

3.2.2 Laserstrahlschweißen von Kupfer

Werden Kupferwerkstoffe mittels Laserstrahlung gefügt, treten, ähnlich dem Fügen von Aluminium, Prozessinstabilitäten auf, vgl. Abschnitt 2.3.5. In zahlreichen Arbeiten werden Maßnahmen beschrieben, um die Prozessstabilität beim Laserstrahl-Tiefschweißen von Kupfer zu erhöhen. HEIDER ET AL. (2011) und HEIDER ET AL. (2012) verfolgten den Ansatz, mittels einer periodischen Modulation der Laserleistung die Schmelzbaddynamik zu beruhigen, um Schweißsprit-

zer und Poren zu vermeiden. Wird die Schwelle zum Tiefschweißen erreicht, dient die Leistungsmodulation zur gezielten Verringerung der Laserleistung, um eine Überhitzung des Schmelzbades zu verhindern. Eine weitere Möglichkeit zur Stabilisierung des Schweißprozesses ist der Einsatz von überlagerter Strahloszillation (GEDICKE 2011, DAUB ET AL. 2013). Nach GEDICKE (2011) wird dabei die Schmelzbadströmung durch eine höhere Bahngeschwindigkeit des Laserstrahls beruhigt und dies verhindert die Entstehung von Schweißfehlern.

Um die geringe Absorption der Laserstrahlung in Wellenlängenbereichen von 1000 nm oder darüber zu kompensieren, wurden Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen von Kupfer mit einem hybriden Schweißprozess, bestehend aus einer grünen und einer infraroten Laserstrahlquelle, durchgeführt. Grüne Laserstrahlung mit einer Wellenlänge im Bereich von 500 nm weist eine deutlich höhere Absorption beim Laserstrahlschweißen von Kupfer auf. In diversen Veröffentlichungen konnte eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems, die sich vor allem auf die Steigerung der Einschweißtiefe auswirkt, nachgewiesen werden (HESS ET AL. 2010A, HESS ET AL. 2010B, ENGLER ET AL. 2011, HERRMANN 2011, HESS 2012, HEIDER ET AL. 2012).

3.3 Laserstrahlschweißen der Aluminium-Kupfer-Mischverbindung

3.3.1 Laserstrahlschweißen von Aluminium mit Kupfer

Das Laserstrahlschweißen zur elektrischen Kontaktierung von Aluminium mit Kupfer wurde bereits vor über 30 Jahren von JONES (1982) untersucht. Ziel des Einsatzes der Lasertechnik war das Fügen von elektrischen Leitern mit hohem Automatisierungsgrad. Kupfer sollte als Leiterwerkstoff in Elektromotoren wegen seiner großen spezifischen Dichte und aufgrund der hohen Werkstoffpreise durch Aluminium ersetzt werden. Als Anlagentechnik setzte der Autor einen gepulsten Nd:YAG-Laser ein. Es wurden die mechanische Festigkeit und der elektrische Widerstand von Fügeverbindungen im Stumpfstoß bestimmt. Zur elektrischen Widerstandsmessung diente eine Wheatstone'sche Messbrücke. Während des Fügens wurden die Proben seitlich zusammengedrückt. Dadurch konnte die Aluminium-Kupfer-Schmelze aus der Fugestelle transportiert werden. Beim Aufeinandertreffen der Fügepartner entstand eine stoffschlüssige Verbindung, welche vorrangig durch Diffusionsprozesse hervorgerufen wurde. Mit diesem

Prinzip konnten spröde intermetallischen Phasen in der Fügeverbindung reduziert werden. Zugversuche ergaben, dass die Festigkeit der Mischverbindung im Bereich der Festigkeiten des Aluminium-Ausgangswerkstoffs lag. Proben mit hoher mechanischer Festigkeit zeigten keine Erhöhung des elektrischen Widerstands in Bezug auf die Ausgangswerkstoffe. Fazit der Arbeit war, dass durch ein moderates Andrücken der Fügepartner während des Schweißens Verbindungen mit guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften erzielt werden können.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen haben MYS & SCHMIDT (2004) das Laserstrahlschweißen von Aluminium mit Kupfer ebenfalls mittels eines gepulsten Nd:YAG-Lasers untersucht. Ziel war es, im Hinblick auf elektrische Kontakte die mechanische Festigkeit der Mischverbindung beim direkten Fügen ohne Zusammendrücken der Bauteile zu steigern. Die Motivation für den Einsatz des Laserstrahlschweißens war die Möglichkeit zur Beeinflussung der Schmelzbaddynamik und des Abkühlverhaltens der Mischverbindung durch eine präzise gesteuerte örtliche und zeitliche Energiedeposition während des Schweißprozesses. Lösungsansatz in dieser Arbeit war es, die Aluminiumkonzentration in der Schmelze durch einen lateralen Strahlversatz in Richtung des Aluminiums zu erhöhen. Damit konnte die Bildung von besonders spröden intermetallischen Phasen wie CuAl_2 verringert werden. Eine Steigerung der mechanischen Festigkeit um 25% konnte im Zugversuch bei einem Strahlversatz von 0,2 mm gezeigt werden. Trotz dieser Steigerung wurden lediglich 60% der Festigkeit des Aluminium-Grundwerkstoffs erreicht.

Später wurden vergleichbare Untersuchungen von WEIGL ET AL. (2010B) und SCHMIDT & WEIGL (2010) durchgeführt und mit einer Leistungsmodulation des Nd:YAG-Lasers erweitert. Durch die Leistungsmodulation der gepulsten Laserstrahlung wurde das Parameterfeld für eine gezielte Energiedeposition vergrößert. So konnten Verbindungsfestigkeiten von bis zu 90% der Festigkeit des Aluminium-Grundwerkstoffs erzielt werden.

KRAETZSCH ET AL. (2011) nutzten einen neuen Ansatz, um die Durchmischung der Werkstoffe Aluminium und Kupfer beim Laserstrahlschweißen durch einen lateralen Strahlversatz und den zusätzlichen Einsatz von überlagerter hochfrequenter Strahloszillation zu beeinflussen. Eine Scanneroptik und hochbrillante Laserstrahlung eines Yb:YAG-Faserlasers wurden als Systemtechnik eingesetzt. Bei Überlappschweißungen gelang es, durch die Oszillationsbewegung der Laserstrahlung die beiden Werkstoffe homogen in der Schmelze zu verteilen. Es konnten jedoch keine fehlerfreien Schweißnähte erzeugt werden. Bei weiteren

Untersuchungen von KRAETZSCH ET AL. (2011) an Verbindungen in Stumpfstoßkonfiguration konnten durch den Einsatz der Strahloszillation Festigkeitssteigerungen erzielt werden. Mit einem Strahlversatz von 0,1 mm in Richtung des Aluminiums betrug die im Zugversuch ermittelte Festigkeit der Verbindung 75% der Festigkeit des Aluminium-Grundwerkstoffs.

3.3.2 Methoden zur Vermeidung intermetallischer Phasen

Fortlaufende Untersuchungen zielten darauf ab, die Duktilität der Mischverbindung von Aluminium und Kupfer durch das Einbringen von Zusatzwerkstoffen anzuheben. Dies gelang MYS & SCHMIDT (2004) und später WEIGL ET AL. (2010B) mit Hilfe von Silberfolien zwischen den Fügepartnern bei Überlappverbindungen mit Seitenflächenstoß. Silber wurde aufgrund der metallurgischen Affinität und Verträglichkeit mit beiden Grundwerkstoffen gewählt. Kupfer bildet mit Silber im Gegensatz zu Aluminium keine intermetallischen Phasen. Weiterhin bietet Silber bezüglich der physikalischen Eigenschaften wie Schmelztemperatur und thermische Ausdehnung einen guten Kompromiss zwischen beiden Werkstoffen. Die mechanische Festigkeit der Fügeverbindung konnte mit Silber als Zusatzwerkstoff um den Faktor 3 im Vergleich zu Schweißungen ohne Zusatzwerkstoff und Strahloszillation verbessert werden. Damit wurde ein Versagen der Proben im Aluminium-Grundwerkstoff erreicht.

WEIGL ET AL. (2011A) und WEIGL ET AL. (2011B) vertieften diesen Ansatz. Die Aluminium-Kupfer-Mischverbindung wurde in diesen Arbeiten durch einen AlSi12-Zusatzwerkstoff zwischen den Fügepartnern in Stumpfstoßkonfiguration modifiziert. Als Strahlquelle diente, wie in den Arbeiten zuvor, ein gepulster Nd:YAG-Laser. AlSi12 ist als Zusatzwerkstoff in der Schweißtechnik weit verbreitet. Die Al-Si-Legierungen weisen zwar eine eingeschränkte metallurgische Verträglichkeit mit Kupfer auf, jedoch liegen die Werte der thermischen Dehnung und des Schmelzpunktes zwischen jenen von Aluminium und Kupfer, was sich günstig auswirkt. Dadurch werden Spannungen beim Abkühlprozess in der Schweißnaht reduziert und eine gesteigerte Duktilität der Mischverbindung wird erreicht. Mittels zweier separater Schweißnähte konnten so Mischverbindungen aus Al-AlSi12 und AlSi12-Cu erzeugt werden. Dies führte zu verbesserten mechanischen Eigenschaften der Schweißnähte, was die Autoren anhand von Vier-Punkt-Biegeversuchen nachwiesen. Die maximale Durchbiegung konnte um den Faktor 2,6 im Vergleich zu Verbindungen ohne Zusatzwerkstoff verringert werden.

Aufgrund der großen metallurgischen Komplexität der aufgeführten Mischverbindungen wurde nach weiteren Lösungsansätzen zur Verbindungsherstellung von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen gesucht. Verschiedene Arbeiten berichten zwar über hohe Zugfestigkeiten der Fügeverbindungen, jedoch gelten diese nur für den Laborbetrieb. Im industriellen Umfeld konnten sich laserstrahlgeschweißte Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen noch nicht durchsetzen. WEIGL ET AL. (2010A) legten eine weitere Möglichkeit zum Fügen der Mischverbindung mit gepulster Laserstrahlung dar. Die direkte Verbindung der Werkstoffe wird durch ein vorher gefertigtes walzplattiertes Aluminium-Kupfer-Zwischenelement ersetzt. Walzplattieren ist ein Festphasen-Fügeverfahren, welches ein prozesssicheres Verbinden von Aluminium und Kupfer erlaubt. Ziel der experimentellen Studie war es, elektrische Kontakte mit hervorragenden elektrischen und mechanischen Eigenschaften herzustellen. Die Fügepartner wurden so angeordnet, dass eine Kehlnaht zwischen dem Aluminium-Leiter und der Aluminium-Oberseite des Zwischenelements gefügt wurde. Auf der Unterseite wurde entsprechend der Kupferleiter mit der Kupfer-Unterseite des Zwischenelements verschweißt. Durch diese Anordnung konnten artgleiche Fügeverbindungen mit zwei Kehlnähten erzeugt werden und die Mischverbindung wurde auf das Herstellungsverfahren Walzplattieren verlagert (siehe **Abbildung 3-1**). Zugversuche zeigten, dass die Bruchdehnung gegenüber 7% bei einer direkt gefügten Aluminium-Kupfer-Mischverbindung auf 22% gesteigert werden konnte. Die Festigkeit des Verbundes konnte jedoch nicht signifikant erhöht werden.

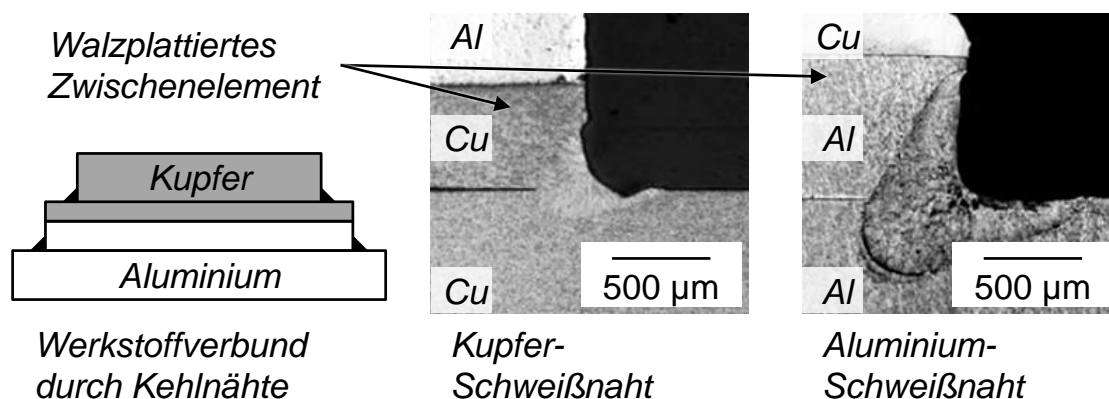


Abbildung 3-1: Artgleiches Fügen von Aluminium und Kupfer mit Hilfe eines walzplattierten Aluminium-Kupfer-Zwischenelements, welches durch Kehlnähte an die Aluminium- bzw. Kupferbauteile gefügt werden (nach WEIGL ET AL. 2010A, S. 556)

Analog zu WEIGL ET AL. (2010A) stellten STANDFUSS ET AL. (2010) eine Studie zur Herstellung von Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen mittels Rührreißschweißen, laserinduziertem Walzplattieren und Schrauben vor. Mit Hilfe der Zwischenelemente kann der Gesamtverbund mit dem Laser artgleich gefügt werden, um dessen bereits erwähnte produktionstechnische Potenziale bei der elektrischen Kontaktierung zu nutzen. Zum Vergleich der Fügeverfahren wurde die elektrische Leitfähigkeit der Fügeverbindungen an Probenblechen gemessen. Laserinduziertes Walzplattieren und Rührreißschweißen wurden als Fügeverfahren mit dem Ergebnis sehr geringer elektrischer Widerstände identifiziert und damit für den Einsatz bei der Herstellung von Aluminium-Kupfer-Zwischenelementen empfohlen.

3.4 Elektrische Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen

3.4.1 Überblick relevanter Fügeverfahren

LEE ET AL. (2010) erarbeiteten eine Übersicht über Fügeverfahren zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriesystemen. Zur elektrischen Kontaktierung der Batteriezellen wurden die Fügeverfahren Ultraschallschweißen, Widerstandsschweißen, Laserstrahlschweißen und Schrauben beschrieben. Im Fokus stand die Erfüllung von produktionstechnischen Rahmenbedingungen wie bezüglich der Fertigungszeit und der Automatisierbarkeit. Technologische Randbedingungen, wie das Fügen von Mischverbindungen und die elektrische Leitfähigkeit der Kontakte, wurden dennoch mitberücksichtigt. Das Ultraschallschweißen wurde als ein geeignetes Fügeverfahren zur Kontaktierung der Ableiterbleche aus Aluminium und Kupfer bewertet. Eine große Anbindungsfläche bei geringem Wärmeeintrag wurde als zentraler Vorteil des Verfahrens angegeben. Die Einschränkung auf Überlappverbindungen sowie hohe Anforderungen an die Beschaffenheit der Bauteiloberflächen wurden als Nachteile des Verfahrens beschrieben. KIM ET AL. (2011) veröffentlichten eine experimentelle Studie zum Kontaktieren von Lithium-Ionen-Batterien mittels Ultraschallschweißen und kamen zu demselben Ergebnis wie LEE ET AL. (2010). Bei einer geeigneten Oberflächenrauigkeit der Leiterwerkstoffe konnten Aluminium-Kupfer-Verbindungen prozesssicher hergestellt werden.

Das Fügeverfahren Widerstandsschweißen bietet den Vorteil, dass bei einem hohen Automatisierungsgrad mehrere Schweißpunkte zur Verbindungsherstellung

auf den Kontakt aufgebracht werden können. LEE ET AL. (2010) führten die geringen Investitionskosten und das Fügen ohne Zusatzwerkstoffe oder Schutzgase als weitere Vorzüge dieser Technologie auf. Das Fügen leitfähiger Werkstoffe führt jedoch zu Prozessinstabilitäten und schränkt die Standzeiten der Werkzeuge erheblich ein.

Laserstrahlschweißen wurde als Fügeverfahren mit großem Potential zur elektrischen Kontaktierung der Lithium-Ionen-Zellen erwähnt. Hohe Präzision, berührungsloses Fügen sowie kurze Prozesszeiten mit sehr geringem Wärmeeintrag wurden als Vorteile hervorgehoben. Hohe Investitionskosten und die Herausforderungen beim Fügen von Mischverbindungen wurden als Nachteile angegeben (vgl. auch Abschnitt 2.3.7).

Mechanisches Fügen mittels Schrauben wurde von LEE ET AL. (2010) als das bisher am häufigsten eingesetzte Fügeverfahren zur Zellkontaktierung genannt. Dies wird mit der Möglichkeit zur Demontage und zum Kontaktieren ohne Wärmeeintrag begründet. Diesen positiven Eigenschaften stehen jedoch ein aufwändiger Montageprozess sowie das Einbringen zusätzlicher Massen durch Bolzen und Muttern gegenüber. Das Fazit der Autoren war, dass grundsätzlich Schweißverfahren aufgrund ausgezeichneter elektrischer und mechanischer Eigenschaften der Kontakte den mechanischen Fügeverfahren vorzuziehen sind.

Auch wenn im Zentrum der vorliegenden Arbeit das Fügeverfahren Laserstrahlschweißen steht, werden im Folgenden Arbeiten vorgestellt, welche mechanische Fügeverfahren zur elektrischen Kontaktierung detailliert betrachten. Eine Arbeit zur Beurteilung der elektrischen Eigenschaften geschraubter Kontakte an Lithium-Ionen-Batterien wurde von TAHERI ET AL. (2011) veröffentlicht. In dieser Publikation stand die Untersuchung des Einflusses der resultierenden effektiven Kontaktfläche bei geschraubten Kontakten auf den elektrischen Kontaktwiderstand im Vordergrund. In dem präsentierten Versuchsaufbau wurde die Anpresskraft zwischen Zelleiter und Zellverbinder variiert und der Gesamtwiderstand der Fügeverbindungen inklusive Zellverbinder mit der Vier-Leiter-Messmethode bestimmt. Der Aufbau der Kontaktgeometrie einer Folienzelle, welcher der Studie von TAHERI ET AL. (2011) zugrunde lag, ist in **Abbildung 3-2** dokumentiert.

Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen wurde ein wesentlicher Einfluss der Anpresskraft auf den Kontaktwiderstand identifiziert. Durch Reinigung der Kontaktflächen und ein hohes Anzugsmoment bei der Verschraubung konnte eine Reduktion des elektrischen Widerstandes von über 30% erzielt werden.

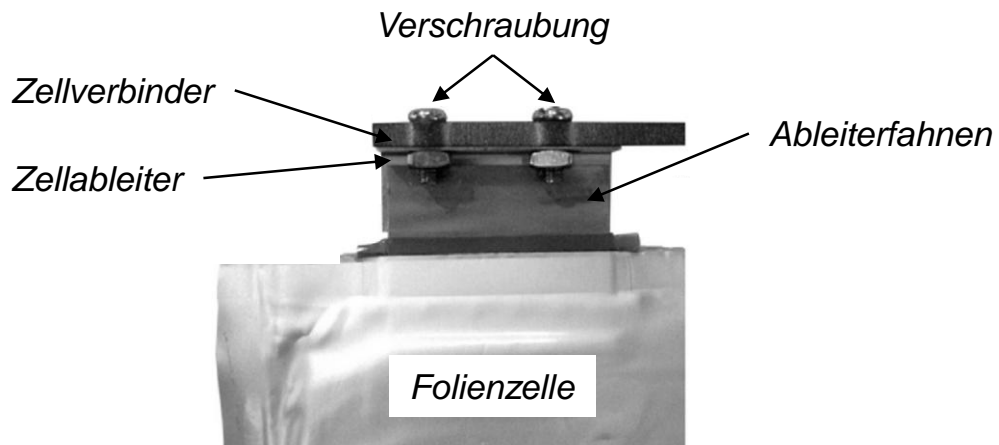


Abbildung 3-2: Ausschnitt des Aufbaus einer untersuchten Lithium-Ionen-Zelle: Zwei Schrauben mit Muttern stellen die elektrische Verbindung zwischen dem Zelleiter (Zusatzelement gefügt an Ableiterfahnen) und dem Zellverbinder her (nach TAHERI ET AL. 2011, S. 6528).

Zusammenfassend erläuterten die Autoren, dass hohe Kontaktwiderstände durch unsachgemäßes Verschrauben der Kontakte zu einer thermischen Belastung der Batteriezelle im Betrieb führen können. Durch die vorgestellten Maßnahmen kann dies verhindert werden und die Effizienz des Batteriesystems kann durch verbesserte elektrische Widerstände an den Zellkontakten erhöht werden.

HENNIGE ET AL. (2013) adressierten den Einsatz des mechanischen Fügeverfahrens Clinchen zur elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batterien im Folienzellen-Format. Die Zellen wurden durch acht Clinchpunkte seriell verschaltet. **Abbildung 3-3** zeigt die mittels Clinchen kontaktierten Batteriezellen.

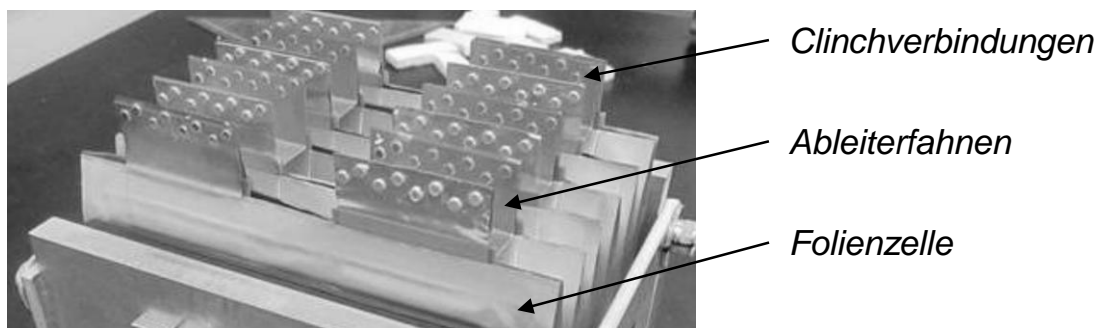


Abbildung 3-3: Geclinchte Aluminium-Kupfer-Ableiterfahnen zur elektrischen Kontaktierung von Folienzellen (Quelle: HENNIGE ET AL. 2013)

Das Clinchen ermöglichte ein direktes Kontaktieren der Aluminium- und Kupfer-Ableiterflächen der Folienzellen. Als Vorteile des Verfahrens nannten die Autoren niedrige Anlagenkosten, geringe Prozesszeiten sowie das Fügen der Aluminium-Kupfer-Mischverbindung ohne Zusatzmaßnahmen. Korrosionstests und die Charakterisierung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Fügeverbindung dienten als Grundlage, um die Füge-technologie zur Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen in Traktionsbatterien zu empfehlen.

3.4.2 Laserstrahlschweißen

Im Zuge des Einsatzes von Lithium-Ionen-Batterien in der Automobilindustrie wurde vermehrt nach einem Fügeverfahren zur elektrischen Kontaktierung der Ableiterwerkstoffe Aluminium und Kupfer gesucht. Ziel war es, den hohen funktionalen und produktionstechnischen Anforderungen an die elektrische Kontaktierung gerecht zu werden. Erste Arbeiten zum Kontaktieren von Lithium-Ionen-Batterien mittels Laserstrahlschweißen wurden von STANDFUSS ET AL. (2010) und SCHEDEWY ET AL. (2011) vorgestellt. Es wurden die Ableiterflächen der Anoden und Kathoden innerhalb von Folienzellen verschweißt. In diesen Untersuchungen wurden artgleiche Fügeverbindungen hergestellt. Die neue Fügeaufgabe umfasste das prozesssichere Laserstrahlschweißen von bis zu 35 übereinanderliegenden Ableitern mit Blechdicken von je 10 bis 20 μm als Herstellungsschritt der Lithium-Ionen-Batterie-Fertigung. Als Anforderungen wurden eine hohe elektrische Leitfähigkeit der Fügeverbindungen sowie das Vermeiden von Poren in den Schweißnähten genannt. Um Poren oder unzureichendes Durchschweißen zu vermeiden, wurden die einzelnen Aluminium- bzw. Kupferfolien ohne Spalt verspannt. Dazu entwickelten STANDFUSS ET AL. (2010) eine Vorrichtung, um die Ableiterstapel möglichst großflächig zu fixieren. Der Laserstrahl eines Yb:YAG-Faserlasers wurde dabei durch eine Aussparung in den Spannbacken im Bereich der Schweißnaht geführt. Anschließend wurden die kontaktierten Folien hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften bewertet. Mit Hilfe der Vier-Leiter-Messmethode konnten Widerstände der Verbindungen gemessen werden, welche im Bereich der Ausgangswerkstoffe lagen.

Darauf aufbauend veröffentlichten SCHEDEWY ET AL. (2011) die Ergebnisse weiterführender Untersuchungen zum Fügen von Folienstapeln. Der Vergleich der mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Verbindungen, die mittels Laserstrahlschweißen und Ultraschallschweißen hergestellt worden waren, stand in dieser Arbeit im Vordergrund. Um die elektrische Leitfähigkeit der laser-

strahlgeschweißten Kontakte zu steigern, wurde die Anbindungsfläche der Verbindung durch Anpassung der Schweißnahtkontur vergrößert. Im Gegensatz zu der zuvor geschweißten linienförmigen Schweißnaht der Überlappverbindung wurde der Laserstrahl des Yb:YAG-Faserlasers wellenförmig über die Folienstapel geführt. Dies erweiterten SCHEDEWY ET AL. (2011) um den Einsatz von überlagerter Strahloszillation. Mit Hilfe dieser Methode wurde die Anbindungsfläche der Verbindungen deutlich vergrößert. Dies führte zu einer Verdopplung der maximalen Zugkraft der Aluminium-Verbindungen im Schälzugversuch. Dennoch lagen die Zugkräfte um ca. 30% unter den Werten der mittels Ultraschallschweißen gefügten Verbindungen. Die laserstrahlgeschweißten Kupferverbindungen übertrafen die maximalen Zugkräfte der ultraschallgeschweißten Proben um ca. 22%. Bei der Bewertung der elektrischen Eigenschaften wurde eine um den Faktor 2 erhöhte elektrische Leitfähigkeit der laserstrahlgeschweißten Kontakte ermittelt. Die elektrische Leitfähigkeit wurde in diesem Fall auf die Anbindungsfläche der jeweiligen Fügeverbindung bezogen. Das Fazit der Autoren war, dass Laserstrahlschweißen zur Kontaktierung der Ableiterstapel von Lithium-Ionen-Zellen geeignet ist. Um eine hohe Prozessstabilität für ein fehlerfreies Laserstrahlschweißen sicherzustellen, bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen.

PLAPPER ET AL. (2013) und SOLCHENBACH & PLAPPER (2013A) untersuchten das Fügen der Zelleiter von Lithium-Ionen-Zellen. Im Fokus stand dabei die Kontaktierung der Aluminium- und Kupferableiter mehrerer Folienzellen innerhalb eines Batteriesystems. Zum prozesssicheren Fügen der Aluminium-Kupfer-Mischverbindung der Ableiter in Blechstärken von 0,1 bis 0,5 mm entwickelten PLAPPER ET AL. (2013) einen Laser-Diffusionsschweißprozess. Hierbei wurde ein Yb:YAG-Faserlaser mit einer Scanneroptik eingesetzt, um die Energiedeposition während des Schweißens gezielt zu steuern. Ziel bei diesem Verfahren war es, lediglich das Aluminiumblech im Überlappstoß aufzuschmelzen, um eine Vermischung der Aluminium- und der Kupferschmelze zu vermeiden. Somit wurde die Fügeverbindung über einen Diffusionsprozess hergestellt, wobei intermetallische Phasen auf ein Minimum reduziert werden konnten. Mit Hilfe von überlagerter Strahloszillation konnte die Prozessstabilität erhöht werden. Gleichzeitig vergrößerte das Strahlpendeln den Anbindungsquerschnitt der Verbindung.

Eine Publikation mit ähnlichem Fokus und vergleichbarer Systemtechnik zum Laserstrahlschweißen von Aluminium und Kupfer mit Blechdicken von 1,0 und 0,6 mm zur Herstellung von elektrischen Kontakten wurde von SMITH ET AL. (2013) veröffentlicht. Auch in dieser Arbeit diente das Laserstrahlschweißen mit überlagerter Strahloszillation dazu, den Energieeintrag während des Fügens zu

steuern. Das Aluminium-Blech wurde in einer Überlappkonfiguration durchgeschweißt, um das darunter liegende Kupferblech nur geringfügig aufzuschmelzen. Mit Scherzugversuchen konnte gezeigt werden, dass diese Verbindungen ähnliche Festigkeiten wie eine artgleiche Aluminium-Verbindung aufweisen.

In einer weiteren Arbeit von SOLCHENBACH & PLAPPER (2013B) wurde das Laserstrahl-Diffusionsschweißen von Aluminium und Kupfer für die Anwendung in Lithium-Ionen-Batterien hinsichtlich der mechanischen Verbindungseigenschaften detailliert untersucht. Ziel der Studie war es, den Einfluss der intermetallischen Phasen auf die Verbindungsfestigkeit zu ermitteln. Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 berichtet, gilt es auch hier, die Bildung der intermetallischen Phasen zu unterdrücken. Zur quantitativen Bestimmung der Phasenausbildung kann die Saumbreite der intermetallischen Verbindungen herangezogen werden. Um Verbindungen mit unterschiedlichen Phasensaumdicken intermetallischer Phasen herzustellen, wurde die eingebrachte Prozessenergie durch den Einsatz einer Leistungsmodulation während des Schweißprozesses variiert. Durch periodisches Ein- bzw. Ausschalten des Yb:YAG-Faserlasers im Bereich von 10 kHz und Einschaltzeiten von 20 bis 60 μs , auch Modulationszeiten genannt, konnte die Ausbildung der intermetallischen Phasen hinsichtlich ihrer Saumbreiten positiv beeinflusst werden. Ein Querschliff der Fügeverbindung der Aluminium-Kupfer-Verbindung mit ausgebildetem intermetallischem Phasensaum ist in **Abbildung 3-4** dargestellt.

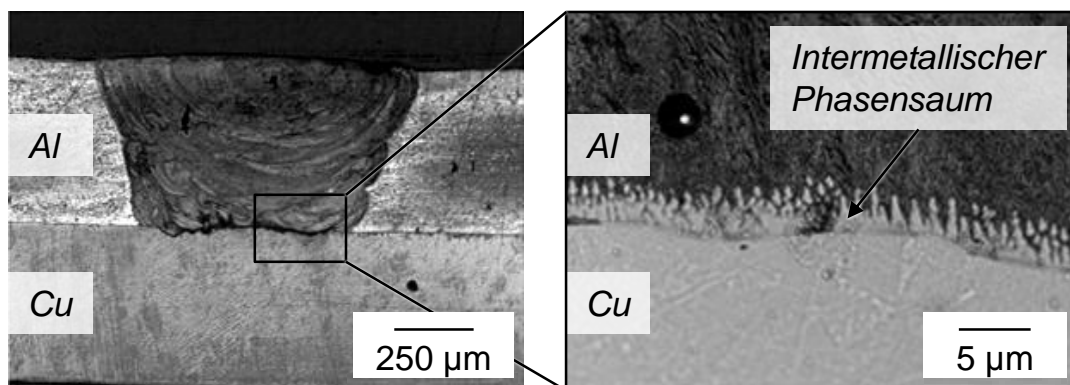


Abbildung 3-4: Schlichtbild der Laser-diffusionsgeschweißten Aluminium-Kupfer-Schweißnaht (links) und Nahaufnahme der Aluminium-Kupfer-Mischverbindung (rechts) (Quelle: SOLCHENBACH & PLAPPER 2013B, S. 253)

Die Verbindungen mit Phasensaumdicken zwischen 2 und 5 μm wiesen die höchste mechanische Festigkeit auf. Bei kleineren Phasensaumdicken waren die Fügepartner unzureichend angebunden, bei größeren Phasensäumen kam es zu einem spröden Bruch der Proben im Zugversuch.

Darüber hinaus haben SOLCHENBACH (2014) und SOLCHENBACH ET AL. (2014) die elektrischen Eigenschaften der durch Laser-Diffusionsschweißen erzeugten elektrischen Kontakte an Lithium-Ionen-Batterien untersucht. Die Anwendung der Laserschweißnähte zur elektrischen Verbindung von zwei Zellen in einer Serienschaltung ist in **Abbildung 3-5** veranschaulicht.

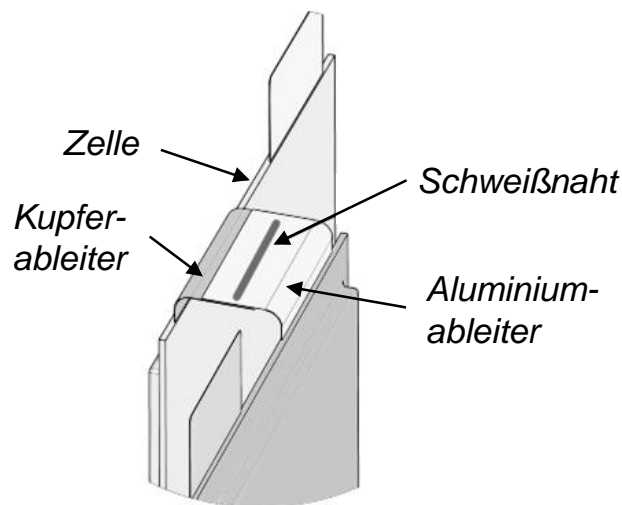


Abbildung 3-5: Serielle Kontaktierung von Folienzellen als Anwendung des Laser-Diffusionsschweißens (nach SOLCHENBACH ET AL. 2014, S. 184)

In dieser Konfiguration werden die Aluminium-Kathoden mit den Kupfer-Anoden verschweißt. Ein Ziel dieser weiterführenden Studie war es, die elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Phasensaumdicken der intermetallischen Phasen darzustellen. Zudem wurde der Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und mechanischer Festigkeit der Fügeverbindungen untersucht. Die bereits von SOLCHENBACH & PLAPPER (2013B) genannten Phasensaumdicken zwischen 2 und 5 μm wiesen sowohl den geringsten elektrischen Widerstand als auch die höchste mechanische Festigkeit auf. Auch hier diente die zeitliche Modulation der Laserleistung zur gezielten Beeinflussung der Phasensäume der intermetallischen Verbindungen. Die Zusammenhänge zwischen elektrischem Widerstand und Phasensaumdicke sowie elektrischem Widerstand und Scherzugfestigkeit der Verbindungen sind in **Abbildung 3-6** dokumentiert.

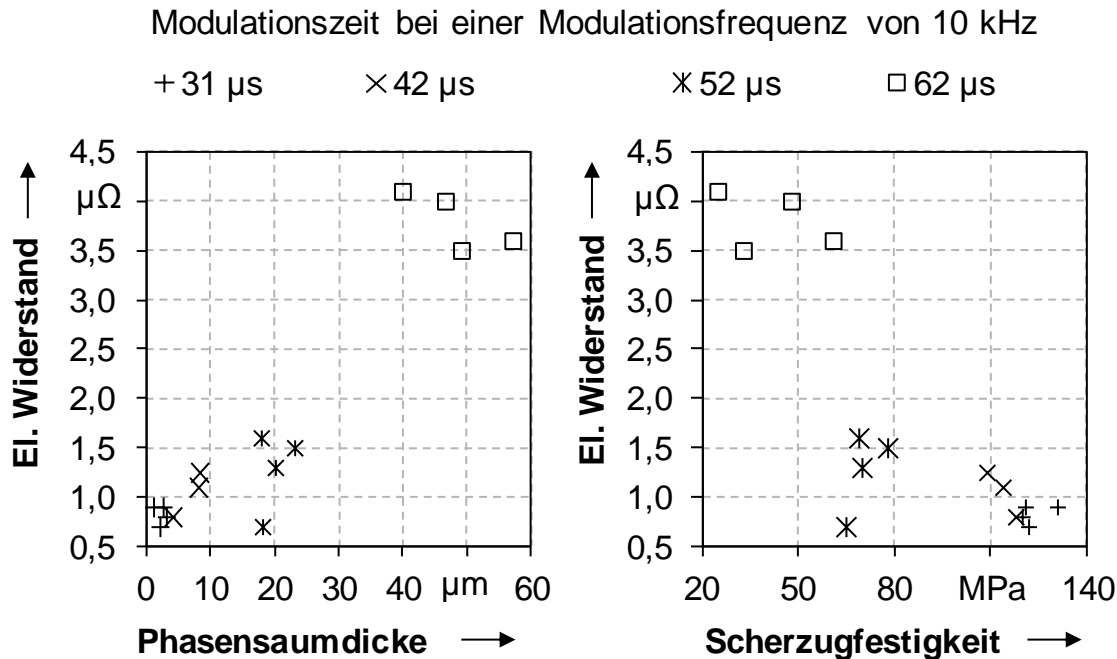


Abbildung 3-6: Elektrischer Widerstand über der Phasensaumdicke bei unterschiedlichen Modulationszeiten (links) und elektrischer Widerstand über der Scherzugfestigkeit bei unterschiedlichen Modulationszeiten (rechts); Werkstoffe: Aluminium EN AW-1050A und Kupfer EN CW-024A, Scherzugproben: 135 mm x 40 mm mit 25 mm Überlapplänge (nach SOLCHENBACH ET AL. 2014, S. 187)

Weitere Untersuchungen dieser Veröffentlichung zielen auf den Einfluss der Schweißnahtgeometrie auf den elektrischen Widerstand der Fügeverbindung ab. Ziel war es, den elektrischen Widerstand durch Variation der Schweißnahtgeometrie zu reduzieren. Dabei nutzten die Autoren Erkenntnisse, die auf den Veröffentlichungen von SCHMIDT ET AL. (2012) und SCHMIDT ET AL. (2013A) basieren. So wurden zwei parallel aufgebrachte Schweißnähte mit einem möglichst großen Abstand zueinander auf einer Überlappverbindung geschweißt. Die sowohl experimentell als auch mit Hilfe einer FEM-Simulation ermittelten Ergebnisse zeigten, dass durch zwei parallele Schweißnähte der elektrische Verbindungswiderstand im Vergleich zu einer einzelnen Schweißnaht annähernd halbiert werden kann. Als Begründung wird zum einen eine homogene Stromlinienverteilung im Bereich der Fügeverbindungen angeführt. Zum anderen werden die Bleche im Überlappstoß mit zwei Schweißnähten elektrisch parallel geschaltet, wobei sich der Strom auf beide Fügepartner aufteilt. SOLCHENBACH ET AL. (2014) kamen weiter zu dem Schluss, dass durch eine Erhöhung der Überlapplänge und zwei parallel aufgebrachte Schweißnähte der elektrische Widerstand der Verbindung weiter reduziert werden kann.

MEHLMANN ET AL. (2013) veröffentlichten eine Studie zur elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen im Rundzellen-Format. Die Anode ist bei der betrachteten Zelle mit dem Zellgehäuse verbunden. Die Kathode befindet sich mittig auf der Zelloberseite. Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, das Zellgehäuse aus vernickeltem Stahl (DC04, Blechdicke 250 μm) mit einem Kupfer-Zellverbinder (CuSn6, Blechdicke 200 μm) im Überlappstoß zu verschweißen. Als Systemtechnik wurde ein Yb:YAG-Faserlaser mit einer Scanneroptik eingesetzt, um Laserschweißungen mit überlagerter Strahloszillation durchzuführen. Vorteil dabei ist eine hohe Genauigkeit bei der Regulierung der Einschweißtiefe. Ein prozesssicheres Fügen ohne Durchschweißen konnte damit in dieser Arbeit nachgewiesen werden, siehe **Abbildung 3-7**. Zur Bewertung der geschweißten elektrischen Kontakte wurden Widerstandsmessungen mit der Vier-Punkt-Messmethode durchgeführt. Aufgrund unzureichender Messgenauigkeit bei der Widerstandsmessung konnte jedoch keine Aussage über einen Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit und der Anbindungsfläche oder weiteren Einflussgrößen wie der Schweißnahtbreite gefunden werden.

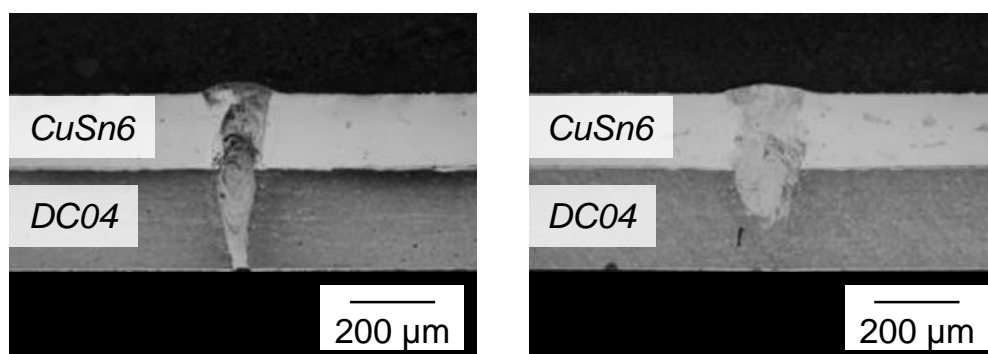


Abbildung 3-7: Durchschweißen des Zellgehäuses aus DC04 bei der elektrischen Kontaktierung (links) und prozesssicher gefügter Zellverbinder und Zellgehäuse (rechts) (nach MEHLMANN ET AL. 2013, S. 4)

3.5 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Der Aufbau eines Batteriesystems mit Lithium-Ionen-Zellen erfordert sowohl das artgleiche als auch das artverschiedene Verbinden von Aluminium- und Kupfer-Werkstoffen. Zur Herstellung *artgleicher Verbindungen* zeigt sich das Laserstrahlschweißen im Hinblick auf die produktionstechnischen und funktionalen Anforderungen an die elektrische Kontaktierung als sehr gut geeignet. Großer Handlungsbedarf besteht aber weiterhin bezüglich der Bewertung und Verbesse-

rung der elektrischen Eigenschaften der gefügten Kontakte. Um die Ergebnisse der vorgestellten Arbeiten einordnen zu können, sind detaillierte Angaben zu Messabweichungen bei der Bestimmung des elektrischen Widerstands der Kontakte sowie eine ausführliche Beschreibung des Versuchsaufbaus notwendig. Diese Details sind leider zumeist nur unvollständig vorhanden. Aspekte wie der Einfluss der Schweißnahtgeometrie auf die elektrischen und mechanischen Kontakteigenschaften sind zwar vereinzelt beschrieben. Allgemeingültige Erkenntnisse und deren Anwendung auf reale Kontaktgeometrien wurden bisher jedoch nicht ermittelt. Gleiches gilt für experimentelle Studien zur thermischen Belastung der Kontaktstelle während des Schweißprozesses, welche insbesondere bei Lithium-Ionen-Zellen eine zentrale Bedeutung einnimmt.

Für die *artverschiedene* Verbindung von Aluminium und Kupfer stellt sich die Situation anders dar. Schmelzschweißverfahren führen zu spröden intermetallischen Phasen, die nur durch aufwändige Methoden im Laborbetrieb soweit reduziert werden können, dass ausreichende Festigkeiten erreicht werden. Für ein prozesssicheres Fügen der Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen sind daher Festphasenfügeverfahren wie Ultraschallschweißen oder Walzplattieren vorzuziehen. Auch hierbei gilt, dass Erkenntnisse sowohl über elektrische als auch mechanische Eigenschaften der durch Festphasenfügeverfahren hergestellten Aluminium-Kupfer-Mischverbindung erforderlich sind.

Daraus leitet sich folgender Handlungsbedarf ab, um die Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen für die industrielle Fertigung zu ermöglichen:

- Für die *artgleichen* Verbindungen von Aluminium bzw. Kupfer muss der Fügeprozess Laserstrahlschweißen insbesondere bezüglich der elektrischen Eigenschaften optimiert und prozesssicher gestaltet werden. Hierbei gilt es, sowohl die Prozessführung als auch die Geometrie der Schweißnaht im Hinblick auf einen geringen elektrischen Widerstand auszulegen. Dazu muss ein geeigneter Prüfstand zur Bewertung der hergestellten elektrischen Verbindungen aufgebaut werden.
- Für die *artverschiedene* Verbindung von Aluminium mit Kupfer sind geeignete Festphasenfügeverfahren zu identifizieren, anzuwenden und zu bewerten.
- Abschließend ist eine geeignete Kombination beider Fügeverfahren vorzuschlagen und im Hinblick auf technologische und wirtschaftliche Aspekte zu bewerten.

Diesen Aspekten widmen sich die weiteren Kapitel der vorliegenden Arbeit.

4 Beschreibung der Versuchsaufbauten

4.1 Allgemeines

Um die in Abschnitt 3.5 genannten Fragestellungen zu beantworten, wurden im experimentellen Teil der vorliegenden Arbeit Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen von elektrischen Verbindungen durchgeführt. In Abschnitt 4.2 wird der dazu entwickelte Versuchsaufbau beschrieben. Neben der Versuchsanordnung und der Probengeometrie werden sowohl die eingesetzte Systemtechnik als auch die untersuchten Werkstoffe vorgestellt. Zur Bewertung der elektrischen Eigenschaften der gefügten Proben wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Prüfstand aufgebaut. Dieser ermöglicht eine hochgenaue Bestimmung des elektrischen Widerstands der erzeugten elektrischen Kontakte. Die Messmethode, der mechanische Aufbau sowie eine Berechnung der Messabweichungen werden in Abschnitt 4.3 besprochen. Teile dieses Abschnitts wurden im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts „*Produktionsforschung zu Hochvolt-speichersystemen für die Elektromobilität (eProduction)*“ erarbeitet und bereits von SCHMIDT ET AL. (2012) veröffentlicht.

4.2 Versuchsaufbau zum Laserstrahlschweißen

4.2.1 Schweißversuche

Als Probengeometrie wurde die Scherzugprobe nach DIN EN ISO 14273 gewählt, wobei die Blechstärke wurde auf 1,0 mm festgelegt wurde. Damit wird eine Probenbreite von 45 mm und eine Probenlänge von 175 mm bei einer Überlap-pung von 35 mm vorgeschrieben. Diese Proben bieten einen ausreichend großen Leiterquerschnitt, um elektrische Ströme von mehreren hundert Ampere übertragen zu können. Die Versuchsanordnung ist in **Abbildung 4-1** schematisch dargestellt.

Über ein Spannelement wurde Fügepartner *A* auf Fügepartner *B* fixiert. Zielgröße der Versuche war die erzeugte Anbindungsfläche, die sich bei linienförmigen Schweißnähten aus Schweißnahtbreite und Schweißnahtlänge zusammensetzt. Zur Bestimmung der Schweißnahtbreite in der Fügeebene wurden Querschlitze angefertigt. Zusätzlich wurde die Schweißnaht in der x-y-Ebene zwischen den

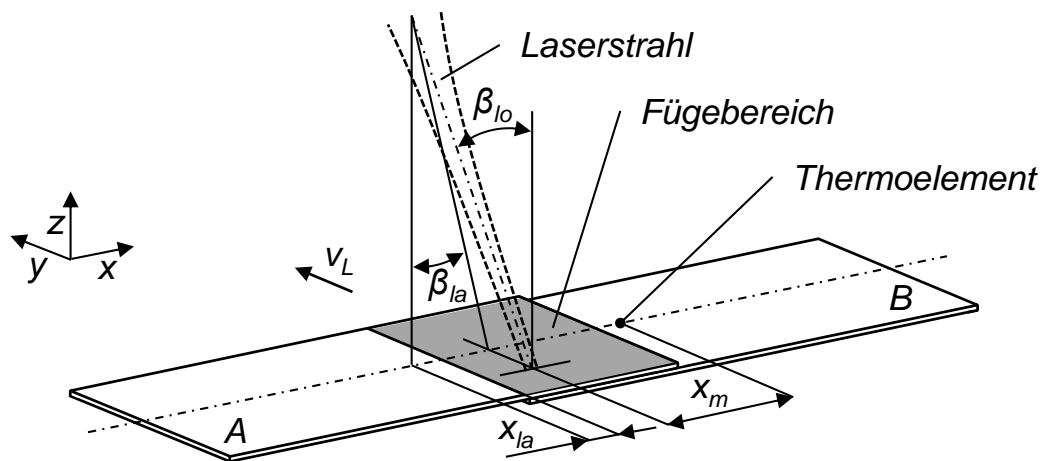


Abbildung 4-1: Versuchsanordnung zum Laserstrahlschweißen der Scherzugprobengeometrie nach DIN EN ISO 14273

Fügepartnern mechanisch getrennt, um die Anbindungsfläche optisch vermessen zu können. Zur Ermittlung der thermischen Belastung der Kontakte wurde die Temperatur der Proben während des Fügeprozesses mittels eines Thermoelements gemessen. Die Messstelle liegt im Fernfeld der Schweißnaht (Abstand x_m) und ist ebenfalls in **Abbildung 4-1** veranschaulicht. Diese Messung erlaubt einen Vergleich der maximalen Temperaturänderungen im Fernfeld der Schweißnaht in Abhängigkeit von Schweißparametern und Schweißnahtgeometrien. Bei der Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen liegen die temperaturempfindlichen Komponenten (vgl. **Tabelle 2-2** auf S. 10) nicht unmittelbar neben der Schweißnaht und werden durch die erwärmten Ableiter aufgrund von Wärmeleitungseffekten thermisch beeinflusst. Daher ist ausschließlich die Temperatur im Fernfeld der Schweißnaht von Interesse.

4.2.2 Lasersystemtechnik

Die Lasersystemtechnik setzt sich aus einer Strahlquelle und einer Optik zusammen. Als Strahlquelle wurde ein Single-Mode-Faserlaser der IPG Laser GmbH verwendet. Dieser Yb:YAG-Laser hat eine Wellenlänge von 1070 nm und eine maximale Laserleistung von 3 kW. Zur Strahlführung wurde eine Scanneroptik der Arges GmbH eingesetzt. Der Laserstrahl kann mit dieser innerhalb eines quadratischen Scanfelds mit einer Kantenlänge von 400 mm bei einem Arbeitsabstand von 500 mm positioniert werden. Das Lasersystem weist ein Strahlparameterprodukt von 0,48 mm·mrad, einen Fokussdurchmesser von 73 μm und eine Intensitätsverteilung der Laserleistung auf, welche einer Gauß'schen Verteilung folgt. Die Strahlvermessung wurde bei einer Laser-

leistung von 2 kW durchgeführt. Die beschriebenen Kenngrößen der Lasersystemtechnik sind in **Tabelle 4-1** zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Kenngrößen der eingesetzten Strahlquelle, der Scanneroptik und des Lasersystems

| Strahlquelle | |
|---|------------------|
| <i>Yb:YAG-Single-Mode-Faserlaser (IPG Laser GmbH)</i> | |
| Max. Laserleistung P_L | 3000 W |
| Wellenlänge λ_{Yb} | 1070 nm |
| Kerndurchmesser des Lichtwellenleiters d_{LWL} | 30 μm |
| Scanneroptik | |
| <i>Remote Welding Elephant 36 SIC (ARGES GmbH)</i> | |
| Brennweite f_f | 550 mm |
| Arbeitsabstand | 500 mm |
| Scanfeldgröße | 400 mm x 400 mm |
| Lasersystem | |
| Rayleighlänge z_R | 2,78 mm |
| Fokusbereich d_f | 73 μm |
| Strahlparameterprodukt SPP | 0,48 mm·mrad |

Um die Strahlquelle durch auftretende Rückreflexionen während des Schweißprozesses nicht zu beschädigen, wurde mit einer Strahlanstellung zwischen 1° und 5° geschweißt. Dadurch wird ein auftretender Rückreflex an der Scanneroptik vorbeigeführt. Die Strahlanstellung wird über den lateralen Abstand ($x_{la} = 10$ mm) von der Bearbeitungszone eingestellt und lässt sich über die resultierenden longitudinalen und lateralen Anstellwinkel nach Gleichung (4-1) berechnen (vgl. **Abbildung 4-1**). Es gilt:

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{\tan^2(\beta_{lo}) + \tan^2(\beta_{la})} \quad (4-1)$$

mit

- θ : Strahlanstellung
- β_{lo} : Longitudinaler Anstellwinkel
- β_{la} : Lateraler Anstellwinkel

4.2.3 Werkstoffe

Gemäß Abschnitt 2.2.4 werden zur elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen an der Kathode der Aluminiumleiter und an der Anode der Kupferleiter gefügt. Als Leiterwerkstoffe sind reine Aluminium- und Kupfermaterialien besonders geeignet, da Legierungselemente zwar die Schweißbarkeit und die mechanischen Eigenschaften steigern können, die elektrische Leitfähigkeit jedoch verringern. Für sämtliche Versuche dieser Arbeit wurde Aluminium EN AW-1050A-H24 mit einem Aluminiumanteil von 99,5% und das sauerstofffreie Kupfer EN CW-008A-R220 mit einem Kupferanteil von 99,95% verwendet. Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften dieser Materialien sind in **Tabelle 4-2** dokumentiert. Die elektrische Leitfähigkeit wurde aufgrund ungenauer Herstellerangaben mit dem im folgenden Abschnitt 4.3 beschriebenen Prüfstand experimentell ermittelt.

Tabelle 4-2: Mechanische Eigenschaften nach DIN EN 485-2 und DIN EN 13599 sowie die experimentell ermittelte elektrische Leitfähigkeit von Aluminium EN AW-1050A-H24 und Kupfer EN CW-008A-R220

| Mechanische und elektrische Eigenschaften | EN AW-1050A-H24 | EN CW-008A-R220 |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Zugfestigkeit R_m | 105 MPa | 220 MPa |
| E-Modul E | 70 GPa | 118 GPa |
| 0,2-%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ | 75 MPa | 140 MPa |
| Querkontraktionszahl ν | 0,33 | 0,35 |
| Elektrische Leitfähigkeit σ | 34,7 m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$) | 58,9 m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$) |

4.3 Messung des elektrischen Widerstands

Der im Folgenden beschriebene Versuchsaufbau dient zur Messung des Widerstands von elektrischen Verbindungen. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Prüfstand entwickelt und aufgebaut. Die Messtechnik wurde basierend auf den Anforderungen an die elektrische Kontaktierung eines Batteriemoduls (vgl. Abschnitt 2.2.5) ausgelegt. Folglich liegt der Messbereich zwischen 10 und

100 $\mu\Omega$. Als Messmethode kam die in Abschnitt 2.4.4 beschriebene Vier-Leiter-Widerstandsmessung zum Einsatz.

4.3.1 Vier-Leiter-Widerstandsmessung

Die Probengeometrie, bestehend aus Fügepartnern A und B , wurde jeweils mit dem Prüfstrom I_0 beaufschlagt. Über vier Messspitzen wurden die Spannungsabfälle $U_{A'}$ und $U_{B'}$ der unbeeinflussten Fügepartner A bzw. B sowie der Fügeverbindung $U_{X'}$ bestimmt. In **Abbildung 4-2** wird das Prinzip zur Messung der Spannungsabfälle $U_{A'}$, $U_{X'}$ und $U_{B'}$ illustriert. Die Messspitzen haben jeweils den identischen Abstand ($l_x = 40$ mm). Um die Messspitzen präzise und wiederholgenau aufsetzen zu können, wurde der Abstand der Prüfspitzen größer als die Überlapplänge gewählt. Die Messstrecke ist deshalb 5 mm länger als die Überlapplänge ($l_{\ddot{u}} = 35$ mm).

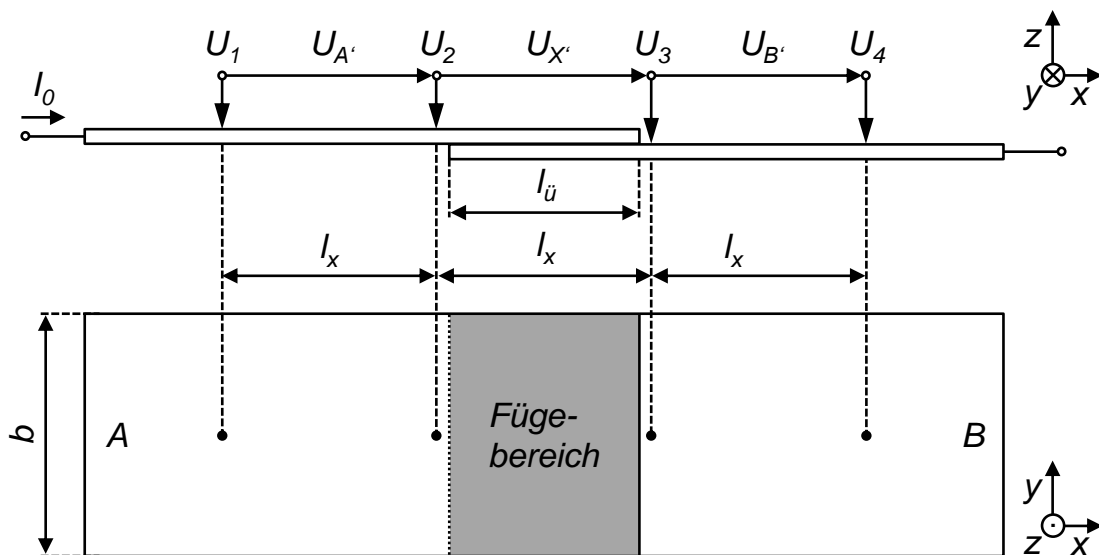


Abbildung 4-2: Prinzip zur Messung der Spannungsabfälle $U_{A'}$, $U_{X'}$ und $U_{B'}$ über der Messstrecke l_x einer im Fugebereich kontaktierten Scherzugprobe mit den Fügepartnern A und B bei anliegendem Prüfstrom I_0

Um den Verbindungswiderstand R_X zu bestimmen, wurden die Leiteranteile außerhalb der Überlappverbindung von der gemessenen Spannung $U_{X'}$ subtrahiert. Zur Vergleichbarkeit der Spannungen wurde dies für $U_{A'}$ bzw. $U_{B'}$ ebenfalls durchgeführt, sodass die Spannungen der Fügepartner A (U_A) und B (U_B) sowie des Fugebereichs (U_X) über der gleichen Leiterlänge vorlagen (vgl. Gleichungen (4-2)). Es gilt:

$$U_A = U_{A'} \cdot \frac{l_{ii}}{l_x}; \quad U_B = U_{B'} \cdot \frac{l_{ii}}{l_x}; \quad U_X = U_{X'} \cdot \frac{l_{ii}}{l_x} \quad (4-2)$$

mit

- $U_{A'}$: Spannungsabfall über l_x (Fügepartner A)
- $U_{B'}$: Spannungsabfall über l_x (Fügepartner B)
- $U_{X'}$: Spannungsabfall über l_x (Fügeverbindung)
- U_A : Spannungsabfall (Fügepartner A)
- U_B : Spannungsabfall (Fügepartner B)
- U_X : Spannungsabfall über dem Verbindungswiderstand R_X

Mit Hilfe von Gleichung (2-9) kann nun der elektrische Widerstand der Fügepartner A, B (Leiterwiderstände R_A und R_B) bzw. der Fügeverbindung über der Überlapplänge l_{ii} (Verbindungswiderstand R_X) berechnet werden.

4.3.2 Definition der Kontaktgütemaßzahl

Durch die Anordnung der vier Messspitzen kann sowohl der Leiterwiderstand der unbeeinflussten Fügepartner als auch der Verbindungswiderstand der Probe ermittelt werden. Dies ermöglicht eine direkte Berechnung der in Anlehnung an BOEHME (2005, S. 106-108) definierten Kontaktgütemaßzahl k_u . Mit Hilfe dieser dimensionslosen Größe wird eine werkstoffunabhängige Bewertung der elektrischen Eigenschaften des Kontaktes vorgenommen. Bei einer Verschlechterung der elektrischen Leitfähigkeit nimmt die Kontaktgütemaßzahl zu. Für gleichartige Fügepartner ist die Kontaktgütemaßzahl nach Gleichung (4-3) folgendermaßen definiert:

$$k_u = \frac{U_X}{U_A} = \frac{U_X}{U_B} = \frac{R_X}{R_A} = \frac{R_X}{R_B} \quad (4-3)$$

mit

- R_A : Leiterwiderstand des Fügepartners A
- R_B : Leiterwiderstand des Fügepartners B
- R_X : Verbindungswiderstand

Für artverschiedene Fügepartner lässt sich die Kontaktgütemaßzahl mit Gleichung (4-4) formulieren. Es gilt:

$$k_u = \frac{2 \cdot U_X}{(U_A + U_B)} = \frac{2 \cdot R_X}{(R_A + R_B)} \quad (4-4)$$

Bei vollflächiger Kontaktierung des Fügebereichs liegt in diesem Leiterabschnitt im Vergleich zu den Fügepartnern *A* und *B* der doppelte Leiterquerschnitt vor. Dieser Fall entspricht einer idealen elektrischen Verbindung der in **Abbildung 4-1** dargestellten Probengeometrie. Die Kontaktgütemaßzahl beträgt demnach $k_u = 0,5$. Bei einer Kontaktgütemaßzahl von $k_u = 1,0$ treten in der Fügeverbindung keine zusätzlichen elektrischen Verluste auf, da die Leiterwiderstände und der Widerstand der Fügeverbindung den gleichen Wert aufweisen.

4.3.3 Prüfstand und Messtechnik

Als Messmittel wurden das Präzisionsmultimeter Fluke 8846 der Fluke GmbH und die Stromquelle N8732A der Firma Agilent Technologies Inc. ausgewählt. Die Software LabVIEW der Firma National Instruments Inc. zeichnet Strom- und Spannungswerte auf und gibt für die entsprechenden Messstrecken den über die Prüfzeit $t_{Prüf}$ gemittelten Widerstandswert aus. Aufgrund der kleinen Widerstandswerte wird ein möglichst hoher Prüfstrom verwendet, um das Niveau der aufgezeichneten Spannungen anzuheben. Dies ermöglicht eine Spannungsmessung mit einer geringen relativen Messabweichung (vgl. Gleichung (4-6)). Damit keine Erwärmung der Probe aufgrund der Strombelastung während der Messung auftritt, wurde der Prüfstrom I_0 auf 180 A begrenzt. Die Prüfzeit $t_{Prüf}$ beträgt zwei Sekunden bei einer Abtastrate f_s von 10 Hz. Eine Übersicht der technischen Daten der Messmittel sowie der Prüfparameter wird in **Tabelle 4-3** angegeben.

Tabelle 4-3: Technische Daten der Messmittel und Parameter der Prüfsoftware

| | |
|--|-------------------|
| Messmittel <i>Fluke 8846 (Fluke GmbH) und N8732A (Agilent Technologies Inc.)</i> | |
| Bereich der Spannungsmessung | 100 nV bis 100 mV |
| Max. Prüfstrom | 330 A |
| Nennleistung | 330 W |
| Prüfsoftware und -parameter <i>LabVIEW (National Instruments Inc.)</i> | |
| Prüfstrom I_0 | 180 A |
| Prüfzeit $t_{Prüf}$ | 2 s |
| Abtastrate f_s | 10 Hz |

Zur elektrischen Kontaktierung des Prüfkörpers wird die Probe mittels zweier pneumatischer Druckzylinder auf zwei Kupfer-Elektroden gedrückt. Die vier Messspitzen werden durch einen weiteren Druckzylinder auf der Probe positioniert (vgl. **Abbildung 4-3**).

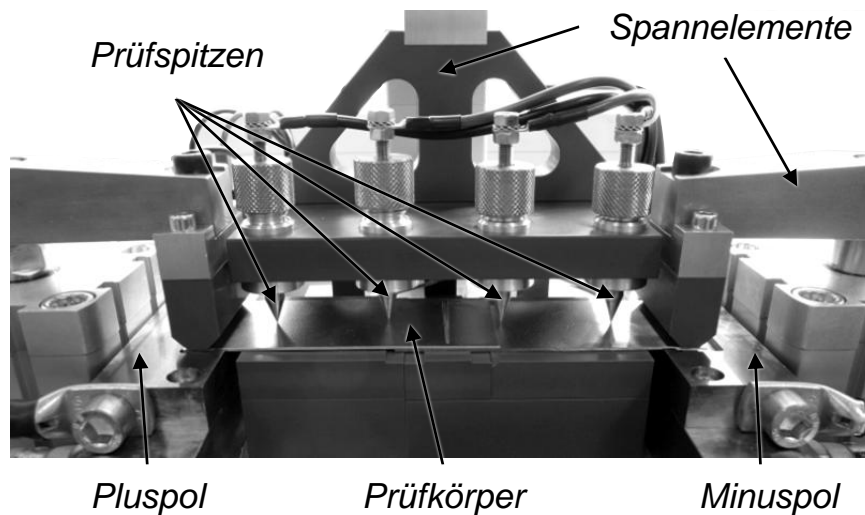


Abbildung 4-3: Versuchsaufbau zur Messung des elektrischen Widerstands

4.3.4 Berechnung von Messabweichungen

Die gemessenen Spannungen und der ausgegebene Prüfstrom sind mit systematischen und zufälligen Fehlern behaftet, welche zu Messabweichungen führen. Die Temperaturänderung der Probe steht in einem direkten Zusammenhang zum gemessenen elektrischen Widerstand. Bis zu einer Temperatur von ca. 100 °C steigt der Widerstand mit zunehmender Temperatur proportional an (HOFMANN ET AL. 2013, S. 139). Diese systematische Widerstandsänderung ΔR_{Temp} wird durch eine stete Überwachung der Probentemperatur mit Hilfe von Gleichung (4-5) berechnet und kompensiert. Dennoch unterliegt die Temperaturmessung nach DIN EN 60584 mittels Oberflächen-Thermoelementen der SAB Bröckers GmbH einer zufälligen Abweichung $\Delta\vartheta$ von $\pm 0,5$ K. Daher wird in der Messabweichung des Verbindungswiderstands eine Abweichung von $\Delta\vartheta = 1$ K berücksichtigt. Es gilt:

$$\Delta R_{Temp} = R_X \cdot \alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta \quad (4-5)$$

mit

ΔR_{Temp} : Widerstandsabweichung aufgrund der Temperaturänderung $\Delta\vartheta$

α_{20} : Materialspezifischer Temperaturbeiwert bei 20 °C

$\Delta\vartheta$: Temperaturänderung der Probe

Die in dieser Arbeit dokumentierten Widerstandswerte beziehen sich auf die Referenztemperatur von $T_{Ref} = 22 \text{ °C}$. Nach VINARICKY (2002, S. 29) gelten die Temperaturbeiwerte $\alpha_{20,Al} = 0,0047 \text{ 1/K}$ für Aluminium-Werkstoffe sowie $\alpha_{20,Cu} = 0,0039 \text{ 1/K}$ für Kupferwerkstoffe.

Eine weitere Fehlerquelle stellt die begrenzte Messgenauigkeit des Präzisionsmultimeters dar. Nach Herstellerangaben wird die Abweichung der ausgegebenen Spannung ΔU_{Mess} nach Gleichung (4-6) berechnet (FLUKE 2012):

$$\Delta U_{Mess} = \pm 0,00025 \cdot U_X + 3 \text{ } \mu\text{V} \quad (4-6)$$

mit

ΔU_{Mess} : Abweichung der gemessenen Spannung

Auch Toleranzen in der Messspitzenpositionierung können zu erheblichen Abweichungen bei der Spannungsmessung führen. Daher wurden sowohl die Lagerung der Messspitzen als auch die Anschläge zur Positionierung des Prüfkörpers mit möglichst geringen Fertigungstoleranzen hergestellt. Dennoch wird von einer Positioniertoleranz von $\pm 0,05 \text{ mm}$ ausgegangen. Dies wirkt sich direkt auf die Länge der Messstrecke l_x aus und resultiert in einer maximalen Spannungsabweichung U_{Pos} (vgl. Gleichung (4-7)):

$$U_{Pos} = \frac{\rho \cdot I_0 \cdot \Delta l_x}{A_L} \quad (4-7)$$

mit

U_{Pos} : Max. Spannungsabfall aufgrund der Ungenauigkeit der Prüfspitzenpositionierung

Δl_x : Verlängerung der Messstrecke

A_L : Leiterquerschnitt der Probe

Die Gesamtabweichung der Spannung ΔU_X ergibt sich nach Gleichung (4-8) aus der Summe der Abweichungen des Messgeräts und der Prüfspitzenpositionierung:

$$\Delta U_X = \Delta U_{Mess} + U_{Pos} \quad (4-8)$$

mit

ΔU_X : Gesamtabweichung der Spannung

Die Abweichung des ausgegebenen Prüfstroms wird nach den Angaben des Herstellers der Stromquelle N8732A mit Gleichung (4-9) bestimmt (AGILENT 2011):

$$\Delta I_0 = \pm 0,001 \cdot I_0 + 990 \text{ mA} \quad (4-9)$$

Die Berechnung der maximalen Abweichung ΔR_X des berechneten Verbindungswiderstands R_X erfolgt mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes nach Gauß (vgl. Gleichung (4-10)):

$$\Delta R_X = \left| \frac{\delta R}{\delta \Delta \vartheta} \right| \cdot \Delta \Delta \vartheta + \left| \frac{\delta R}{\delta U_X} \right| \cdot \Delta U_X + \left| \frac{\delta R}{\delta I_0} \right| \cdot \Delta I_0 \quad (4-10)$$

Daraus kann nun die maximale relative Messabweichung f_R in Abhängigkeit von den zu erwartenden Verbindungswiderständen bestimmt werden (vgl. Gleichung (4-11)). Es gilt:

$$f_R = \frac{\Delta R_X}{R_X} \quad (4-11)$$

mit

f_R : Maximale relative Messabweichung

Für die Werkstoffe Aluminium und Kupfer ist die maximale relative Messabweichung in Abhängigkeit des Verbindungswiderstands in **Abbildung 4-4** dokumentiert. Die Messabweichungen liegen für den zu erwartenden Verbindungswiderstand von 10 bis 100 $\mu\Omega$ für beide Werkstoffe unter 2%.

4.4 Zusammenfassung

Der in diesem Kapitel beschriebene Versuchsaufbau zum Laserstrahlschweißen sowie der Prüfstand zur Messung elektrischer Widerstände dienen als Basis für die in den folgenden Kapiteln 5 bis 7 beschriebenen experimentellen Untersuchungen. Mit Hilfe der in Abschnitt 4.2 dargestellten Systemtechnik wurden die Werkstoffe Aluminium und Kupfer mittels Laserstrahlschweißen artgleich gefertigt. Die erzeugten Kontakte konnten anschließend mit dem in Abschnitt 4.3 erläuterten Prüfstand zur Widerstandsmessung elektrisch bewertet werden. Um die zu erwartenden kleinen elektrischen Widerstände hochgenau messen zu können,

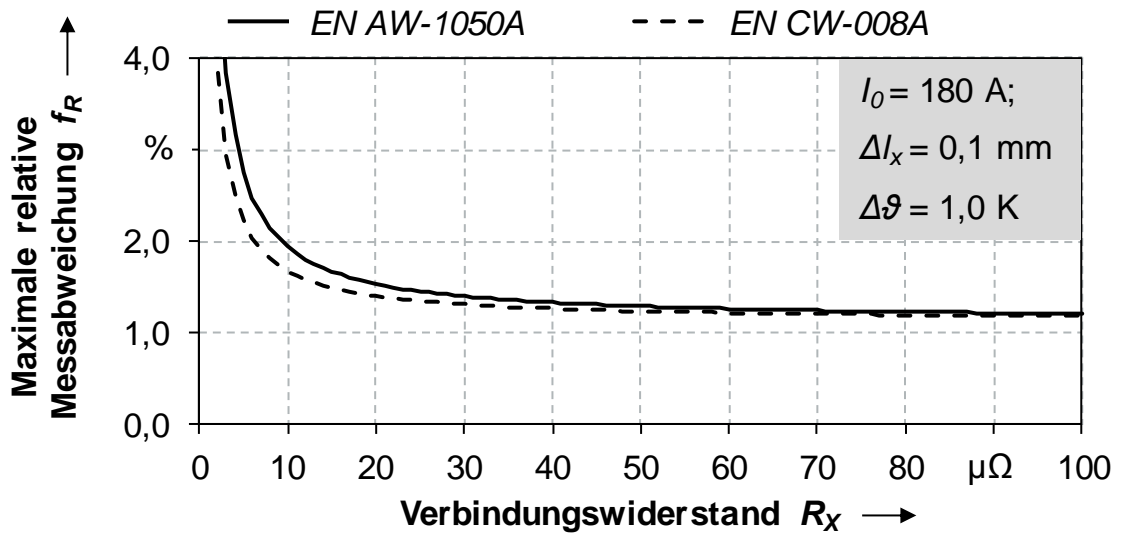


Abbildung 4-4: Maximale relative Messabweichung f_R für die Werkstoffe EN AW-1050A und EN CW-008A bei einem variierenden Messwert R_X

bedarf es der Umsetzung der Vier-Leiter-Widerstandsmessung (vgl. Abschnitt 2.4.4), einer Überwachung der Proben­temperatur, einer präzisen Prüfspitzenpositionierung sowie hochauflösender Messmittel. Um die Aussagekraft der beschriebenen Messmethode bewerten zu können, wurden in Abschnitt 4.3.4 die Messabweichungen durch zufällige Fehler bei der Widerstandsmessung für einen Messbereich von 10 bis 100 $\mu\Omega$ berechnet.

5 Eigenschaften laserstrahlgeschweißter Kontakte

5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird anhand von theoretischen Überlegungen und experimentellen Untersuchungen aufgezeigt, wie durch das Laserstrahlschweißen elektrische Kontakte mit hoher elektrischer Leitfähigkeit hergestellt werden können. Dazu werden die Haupteinflussgrößen auf die Kontaktgütemaßzahl von laserstrahlgeschweißten Kontakten exemplarisch am Beispiel einer Überlappkonfiguration beschrieben (vgl. Abschnitt 5.2). Zu den Haupteinflussgrößen zählen zum einen die Schweißnahtgeometrie, d. h. die Schweißnahtlänge und -breite, und zum anderen die Anordnung mehrerer Schweißnähte innerhalb des Fügebereichs. In einem weiteren Abschnitt werden, mit Bezug zu den in Abschnitt 2.2.5 erläuterten thermischen Randbedingungen von Lithium-Ionen-Zellen, die thermischen Belastungen der Kontaktstellen während des Schweißprozesses auf der Basis experimenteller Untersuchungen analysiert (vgl. Abschnitt 5.3). Hierfür wurden Proben mit unterschiedlichen Anbindungsflächen geschweißt und dabei die Temperatur der Kontaktstelle mit Hilfe von Thermoelementen gemessen. Das Laserstrahlschweißen bietet die Möglichkeit, durch verschiedene Schweißstrategien die gefügte Anbindungsfläche flexibel zu gestalten. Mit dem Ziel einer möglichst geringen thermischen Belastung der Kontaktstelle bei gleichzeitig hoher elektrischer Leitfähigkeit wird für die Werkstoffe Aluminium und Kupfer die am besten geeignete Schweißstrategie ermittelt.

Inhalte zur Bewertung der elektrischen Eigenschaften artgleich gefügter elektrischer Kontakte wurden vom Verfasser teilweise schon in (SCHMIDT ET AL. 2012) und (SCHMIDT ET AL. 2013A) veröffentlicht.

Abweichungen bei der Wiederholung von Schweißversuchen

Die Abweichungen von Versuchsergebnissen werden in Form von Fehlerindikatoren (Fehlerbalken) in allen Diagrammen und Darstellungen angegeben. Bei der Wiederholung einer Messung wird jeweils der maximale und der minimale Messwert um den Mittelwert aller Messwerte dokumentiert. Der zusätzlich eingeführte Parameter s_M steht für die Anzahl der Messungen in einer Versuchsreihe.

5.2 Kontaktgütemaßzahl laserstrahlgeschweißter Verbindungen

5.2.1 Einfluss der Schweißnahtgeometrie auf die Kontaktgütemaßzahl

Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen war es, den Einfluss der Schweißnahtlänge und -breite auf die Kontaktgütemaßzahl¹ zu bestimmen. Hierzu wurden Versuchsproben mit den in Abschnitt 4.2.1 definierten Maßen mittels Laserstrahlschweißen gefertigt. Die Schweißnaht wurde in y-Richtung in die Mitte des Fügebereichs gesetzt, wobei die Länge l_s der Schweißnaht variiert wurde. Zusätzlich wurden Schweißnähte mit und ohne Strahloszillation (vgl. Abschnitt 2.3.3) hergestellt, um den Einfluss der Schweißnahtbreite in der Fügeebene b_s mit zu berücksichtigen. Die Anordnung der Schweißnaht auf der Probengeometrie ist in **Abbildung 5-1** veranschaulicht.

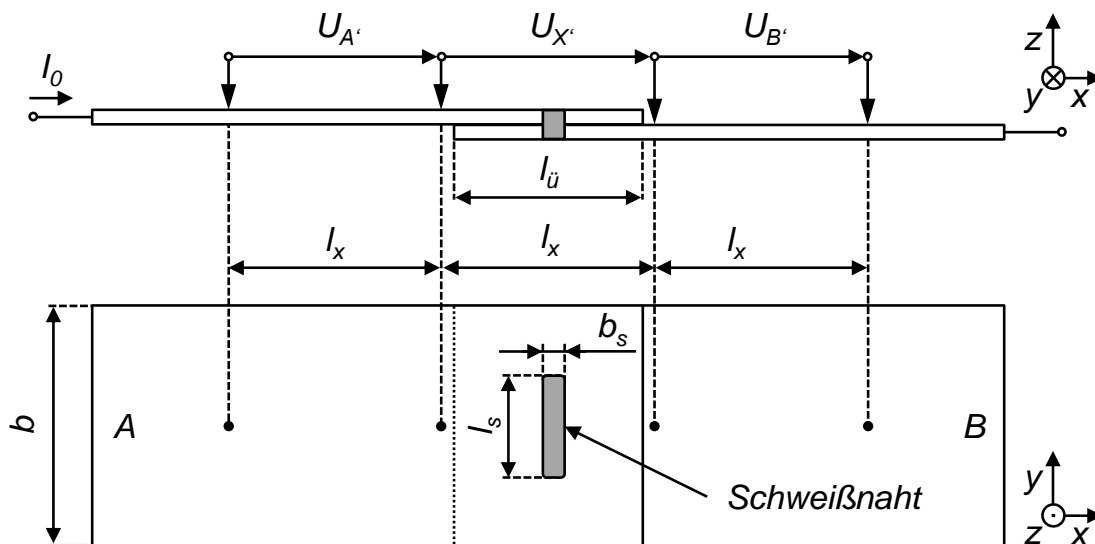


Abbildung 5-1: Vereinfachte Darstellung der Schweißnahtanordnung auf der Probengeometrie mit Angabe der Schweißnahtbreite b_s und der Schweißnahtlänge l_s

Die Untersuchungen wurden für Aluminium EN AW-1050A und Kupfer EN CW-008A durchgeführt. In Voruntersuchungen wurden geeignete Prozessparameter ermittelt, um Schweißnähte ohne Poren und Schmelzbadauswürfe herzu-

¹Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 erläutert, ist die Kontaktgütemaßzahl in Anlehnung an BOEHME (2005) so definiert, dass sie mit einer Verschlechterung der elektrischen Leitfähigkeit der Fügeverbindung ansteigt. Im vorliegenden Fall bezeichnet daher eine sinkende Kontaktgütemaßzahl eine Funktionalitätsverbesserung der Fügeverbindung.

stellen. Die verwendeten Prozessparameter für artgleiche Aluminium- (P1, P2) und Kupferverbindungen (PV, P3, P4) können **Tabelle 5-1** entnommen werden.

Tabelle 5-1: Prozessparameter zur elektrischen Kontaktierung mit linienförmigen Schweißnähten für die Werkstoffe EN AW-1050A (P1, P2) und EN CW-008A (PV, P3, P4)

| Prozessparameter | <i>P1</i> | <i>P2</i> | <i>PV</i> | <i>P3</i> | <i>P4</i> |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Laserleistung P_L in kW | 1,7 | 1,7 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| Vorschubgeschwindigkeit v_L in m/min | 6 | 2 | 120 | 6 | 2 |
| Streckenenergie S_L in kJ/m | 16,5 | 51,0 | 1,5 | 30,0 | 90,0 |
| Radius der kreisförmigen Strahloszillation r_{OSZ} in mm | - | 0,25 | - | - | 0,25 |
| Frequenz der Strahloszillation f in Hz | - | 200 | - | - | 200 |

Der Prozessparametersatz PV dient zum Vorwärmen der Proben und wird lediglich bei Kupferschweißungen angewendet. Hierbei wird die Schweißnaht mit sehr geringer Streckenenergie ($S_L = 1,5$ kJ/m) mehrfach (30-mal) überstrichen, um den oben liegenden Fügepartner vorzuwärmen. Diese Maßnahme verbessert eine prozesssichere Ausbildung der Dampfkapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen von Kupfer und vermeidet Schweißnahtfehler im Anfangsbereich der Fügeverbindung.

Maßgeblich wird die Kontaktgütemaßzahl durch den Verlauf des elektrischen Stroms durch den geschweißten Kontakt hindurch bestimmt. Fließt der Strom durch einen unbeeinflussten Leiter mit konstantem Querschnitt, ergibt sich eine Kontaktgütemaßzahl von $k_u = 1,0$ (vgl. Abschnitt 4.3.2). In diesem Fall liegt eine homogene Stromdichteverteilung innerhalb des Leiters vor. Wird ein Kontakt zweier elektrischer Leiter mit verändertem Querschnitt geschlossen, stellt sich eine inhomogene Stromdichteverteilung ein, welche an die veränderte Leitergeometrie angepasst ist. Die Änderung der Stromdichteverteilung hat einen direkten Einfluss auf die Kontaktgütemaßzahl, die mit Hilfe des in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Prüfstands zur Vier-Leiter-Widerstandsmessung quantifiziert und mittels Gleichung (4-3) berechnet werden kann.

Die Schweißnahtlänge wurde von 2 bis 45 mm variiert. Sie wird als Verhältnis von Schweißnahtlänge l_s zur Probenbreite b angegeben. Die Ergebnisse der Versuche für verschiedene Schweißnahtbreiten sind in **Abbildung 5-2** dokumentiert.

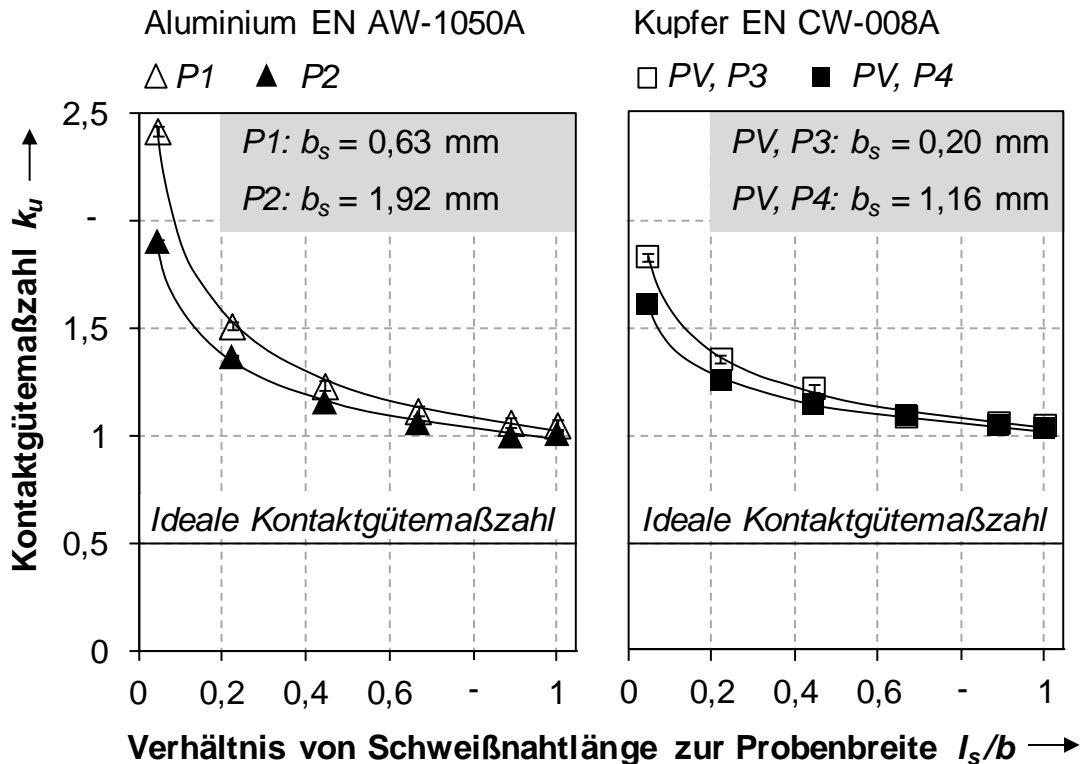


Abbildung 5-2: Gemessener Verlauf der Kontaktgütemaßzahl bei variiertem Schweißnahtlänge für die Werkstoffe EN AW-1050A (links) und EN-CW008A(rechts) mit den Schweißparametersätzen P1 bis P4; je Diagramm $s_M = 36$

Mit zunehmender Schweißnahtlänge wird die Kontaktgütemaßzahl für beide Werkstoffe deutlich reduziert. Wird die gesamte Probenbreite ausgenutzt ($l_s/b = 1$), nähert sich die Kontaktgütemaßzahl dem Wert 1,0. Die Ursache hierfür ist die verringerte Einschnürung der Stromlinien bei zunehmender Schweißnahtlänge. Werden die Stromlinien eingeschnürt, führt dies zu einer Verlängerung des Strompfades, wodurch sich der elektrische Widerstand (vgl. Gleichung (2-8)) und damit der Wert der Kontaktgütemaßzahl erhöht. Die Einschnürung der Stromlinien kann mit Hilfe der Stromdichteverteilung sichtbar gemacht werden. In **Abbildung 5-3** ist die Stromdichteverteilung von Fügepartner A am Beispiel von EN AW-1050A und Schweißparametersatz P2 zu sehen. Diese wurde mit Hilfe des in Abschnitt 6.3.2 und 6.3.3 beschriebenen thermoelektrischen Simulationsmodells der Scherzugprobe berechnet.

Die Schweißnahtbreite wirkt sich trotz einer erheblichen Steigerung der Kontaktfläche (Aluminium Faktor 3, Kupfer Faktor 5,8) nur geringfügig auf die Kontaktgütemaßzahl aus (vgl. auch **Abbildung 5-2**). Lediglich bei sehr kleinen

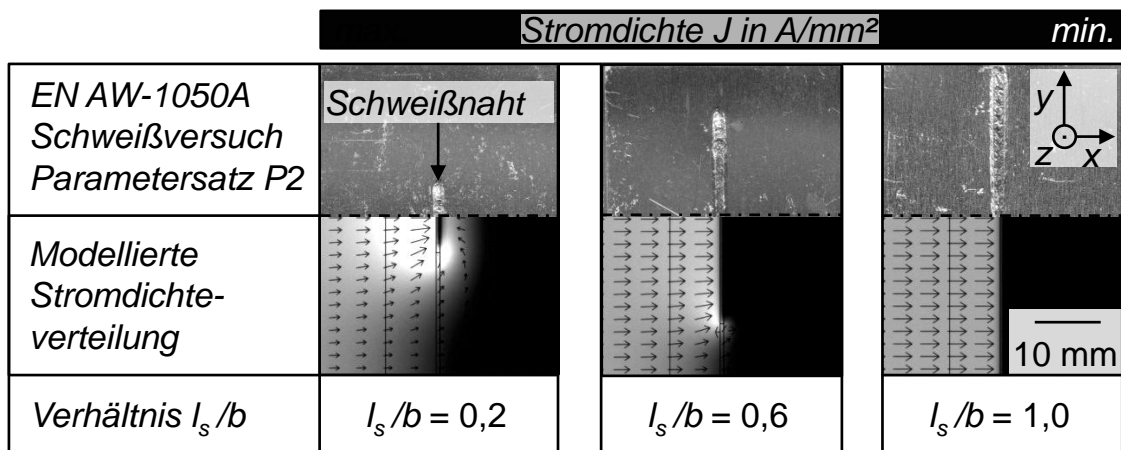


Abbildung 5-3: Modellierte Stromdichteverteilung der Überlappverbindung bei variierendem Verhältnis von Schweißnahtlänge zu Probenbreite l_s/b und Schweißversuch am Beispiel von EN AW-1050A

Schweißnahtlängen ($l_s/b < 0,1$) kann durch den Einsatz der Strahloszillation die Kontaktgütemaßzahl reduziert und damit die elektrische Leitfähigkeit der Fügeverbindung verbessert werden. Bei Kupferwerkstoffen ist dieser Effekt aufgrund der höheren elektrischen Leitfähigkeit gegenüber Aluminium weniger stark ausgeprägt.

Um diesen Einfluss der Schweißnahtbreite auf die Kontaktgütemaßzahl zu verstehen, wurden folgende Überlegungen angestellt: Innerhalb der Fügeverbindung entsteht eine *Serienschaltung* der Fügepartner A ($R_{L,A}$) und B ($R_{L,B}$) sowie der Schweißnaht (R_s). Dies kann mit Hilfe von **Abbildung 5-4** erläutert werden.

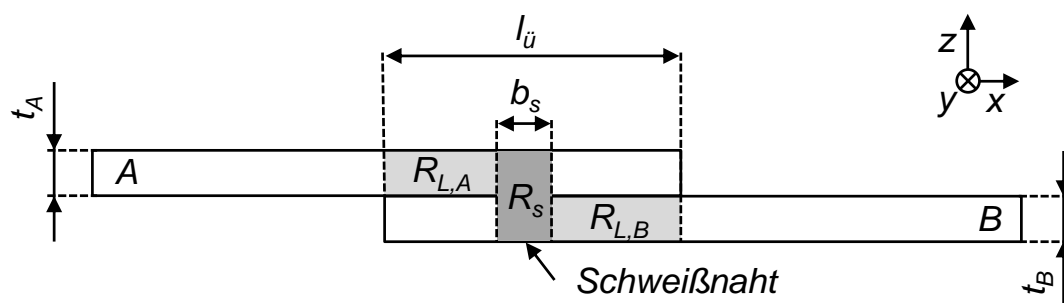


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der elektrischen Widerstände bei einer laserstrahlgeschweißten Überlappverbindung mit einer Schweißnaht ($l_s/b = 1$): Serienschaltung der Widerstände $R_{L,A}$, R_s und $R_{L,B}$

Wird die Probengeometrie mit einer durchgezogenen Schweißnaht gefügt ($l_s/b = 1$, $b_s > 0$), bildet sich eine homogene Stromlinienverteilung in x-Richtung aus. Der elektrische Widerstand bzw. die Kontaktgütemaßzahl der Verbindung

wird deshalb nur durch die Breite der Schweißnaht bestimmt. Werden die Bedingungen $l_s/b = 1$ und $b_s > 0$ erfüllt, liegt eine Kontaktgütemaßzahl $k_u < 1,0$ vor. Der Verbindungswiderstand R_X kann in diesem Fall als Reihenschaltung nach Gleichung (5-1) berechnet werden:

$$R_X = R_{L,A} + R_s + R_{L,B} \quad (5-1)$$

mit

$R_{L,A}$: Leiterwiderstand des Fügepartners A

R_s : Widerstand der Schweißnaht

$R_{L,B}$: Leiterwiderstand des Fügepartners B

Die entsprechenden Einzelwiderstände werden mit Hilfe von Gleichung (2-8) bestimmt und in Gleichung (5-1) eingesetzt. Es gilt:

$$R_X = \frac{\rho_A \cdot \left(\frac{l_{ii}}{2} - \frac{b_s}{2}\right)}{A_{L,A}} + \frac{\rho_s \cdot b_s}{A_{L,A} + A_{L,B}} + \frac{\rho_B \cdot \left(\frac{l_{ii}}{2} - \frac{b_s}{2}\right)}{A_{L,B}} \quad (5-2)$$

mit

ρ_A : spezifischer Widerstand des Fügepartners A

ρ_B : spezifischer Widerstand des Fügepartners B

ρ_s : spezifischer Widerstand der Schweißnaht

b_s : Schweißnahtbreite

$A_{L,A}$: Leiterquerschnitt des Fügepartners A

$A_{L,B}$: Leiterquerschnitt des Fügepartners B

Der spezifische elektrische Widerstand der Schweißnaht ρ_s kann bei artgleichen Schweißverbindungen nach BRAUNOVIC ET AL. (2007) mit dem spezifischen Widerstand der Leiterwerkstoffe gleichgesetzt werden. Damit ergibt sich bei geometrisch identischen Fügepartnern A und B die Gleichung (5-3):

$$R_X = \frac{\rho \cdot \left(l_{ii} - \frac{b_s}{2}\right)}{A_L} \quad (5-3)$$

mit

ρ : spezifischer Widerstand der Fügepartner und der Schweißnaht:

$$\rho = \rho_A = \rho_B = \rho_s$$

A_L : Leiterquerschnitt der Fügepartner A und B: $A_L = A_{L,A} = A_{L,B}$

Nun kann nach Gleichung (4-3) die Kontaktgütemaßzahl k_u in Abhängigkeit der Schweißnahtbreite angegeben werden. Für $l_s/b = 1$ gilt somit:

$$k_u = 1 - \frac{b_s}{2 \cdot l_{\ddot{u}}} \quad (5-4)$$

Die Ursache für den so ermittelten linearen Zusammenhang von Kontaktgütemaßzahl k_u und Schweißnahtbreite b_s ist die lineare Zunahme des Leiterquerschnitts im Bereich der Schweißnaht. Bereits sehr dünne Schweißnähte führen zu Kontaktgütemaßzahlen im Bereich $k_u = 1,0$.

5.2.2 Einfluss der Schweißnahtanordnung auf die Kontaktgütemaßzahl

Um die Kontaktgütemaßzahl weiter zu verbessern, wurden grundsätzliche Betrachtungen zur Anordnung mehrerer Schweißnähte im Bereich der Überlappverbindung angestellt. Ausgangspunkt hierfür war die Überlegung, dass zwei Schweißnähte eine *Parallelschaltung* der Leiter innerhalb der Überlappverbindung erzeugen (vgl. **Abbildung 5-5**).

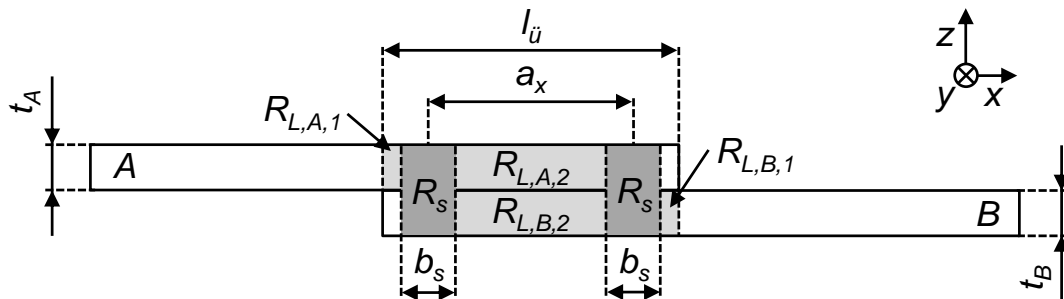


Abbildung 5-5: Schematische Darstellung der elektrischen Widerstände bei einer laserstrahlgeschweißten Überlappverbindung mit zwei Schweißnähten ($l_s/b = 1$): Parallelschaltung der Widerstände $R_{L,A,2}$ und $R_{L,B,2}$

Auch hier lässt sich nach Gleichung (5-5) der Verbindungswiderstand R_X bestimmen. Es muss gelten:

$$R_X = R_{L,A,1} + R_s + (R_{L,A,2} \parallel R_{L,B,2}) + R_s + R_{L,B,1} \quad (5-5)$$

Die Widerstände der Leiter $R_{L,A,2}$ und $R_{L,B,2}$ werden durch die zwei Schweißnähte parallel geschaltet. Die Widerstände $R_{L,A,1}$, $R_{L,B,1}$ und R_s sind seriell zu den Lei-

terwiderständen angeordnet. Aus der Berechnung der Einzelwiderstände nach Gleichung (2-8) und den Annahmen aus Gleichung (5-3) ($R_{L,A} = R_{L,B}$, $\rho = \rho_A = \rho_B = \rho_s$ und $A_L = A_{L,A} = A_{L,B}$) resultiert für den Verbindungswiderstand R_X die Gleichung (5-6):

$$R_X = \frac{\rho}{A_L} \cdot \left(l_{\ddot{u}} - \frac{(a_x + b_s)}{2} \right) \quad (5-6)$$

mit

a_x : Abstand der parallel angeordneten Schweißnähte

Die Kontaktgütemaßzahl wird in Gleichung (5-7) für zwei parallele Schweißnähte angegeben. Für $l_y/b = 1$ gilt:

$$k_u = 1 - \left(\frac{a_x + b_s}{2 \cdot l_{\ddot{u}}} \right) \quad (5-7)$$

In diesem Fall ist die Kontaktgütemaßzahl maßgeblich von dem Abstand zwischen den Schweißnähten a_x abhängig. Die ideale Kontaktgütemaßzahl ($k_u = 0,5$) wird erreicht, wenn die Summe aus der Schweißnahtbreite und dem Abstand der Schweißnähte der Überlapplänge entspricht ($a_x + b_s = l_{\ddot{u}}$). In diesem Fall wird der gesamte Leiterquerschnitt innerhalb des Fügebereichs zur Stromübertragung genutzt.

5.2.3 Experimentelle Validierung

Es wurden Proben hergestellt, um die oben getroffenen Annahmen zur Berechnung des Verbindungswiderstands bzw. der Kontaktgütemaßzahlen zu validieren. Die entsprechenden laserstrahlgeschweißten Proben werden in **Abbildung 5-6** dargestellt. Die Kontaktgütemaßzahl der gefügten Proben wurde ermittelt und mit den nach Gleichung (5-4) bzw. Gleichung (5-7) berechneten Werten verglichen. Die Ergebnisse für die Werkstoffe Aluminium und Kupfer sind in **Abbildung 5-7** dokumentiert.

Die berechneten Kontaktgütemaßzahlen stimmen gut mit den Versuchsergebnissen überein. Die relativen Abweichungen sind kleiner als 5%. Als Ursache für diese Abweichungen können Ungenauigkeiten in der Proben- und Laserstrahlpositionierung angeführt werden. Die parallelen Schweißnähte wurden mit einem Abstand $a_x = 31$ mm gefügt. Werden größere Abstände gewählt, wird der Schweiß-

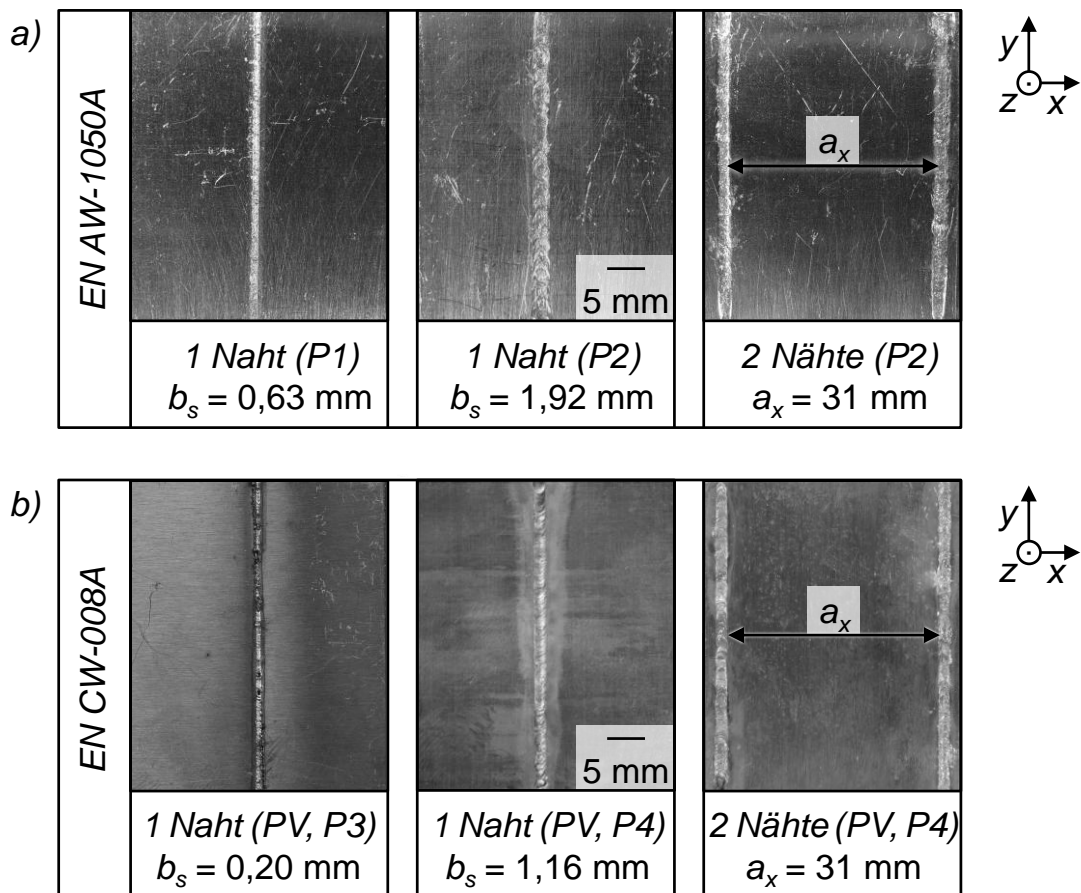


Abbildung 5-6: Schweißversuche mit einer und zwei Schweißnähten: a) Aluminiumverbindungen (Prozessparametersätze P1 und P2); b) Kupferverbindungen (Prozessparametersätze PV, P3 und PV, P4)

prozess von Wärmestauwirkungen überlagert und es können keine Verbindungen mit vergleichbarer Schweißnahtqualität und Schweißnahtbreite hergestellt werden. Das Optimum der Kontaktgütemaßzahl der geschweißten Aluminiumverbindungen liegt bei $k_u = 0,55$ und bei der Kupferverbindungen bei $k_u = 0,57$. Somit wird die theoretisch ideale Kontaktgütemaßzahl nahezu erreicht.

Mit diesen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine deutliche Verbesserung der Funktionalität der Kontakte, d.h. eine reduzierte Kontaktgütemaßzahl durch die Anordnung mehrerer Schweißnähte als Parallelschaltung möglich ist. Zum Auffinden einer optimalen Anordnung der geschweißten Anbindungsfläche für beliebige Kontaktgeometrien wurde eine Methode zur simulationsgestützten Auslegung elektrischer Kontakte entwickelt, die in Kapitel 6 beschrieben ist.

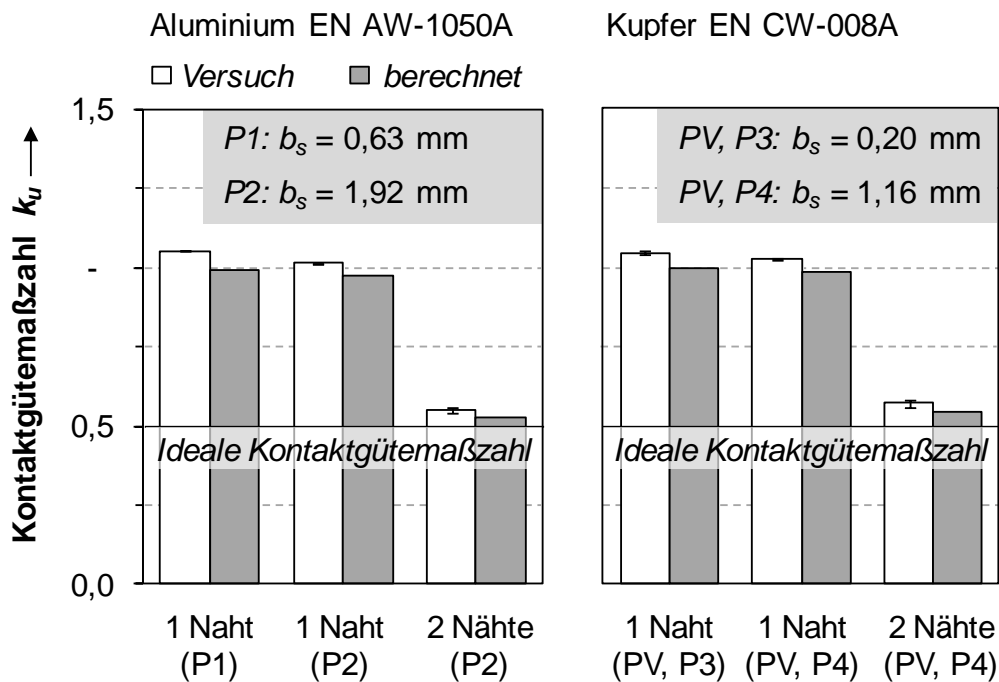


Abbildung 5-7: Vergleich der experimentell bestimmten und der berechneten Kontaktgütemaßzahlen für Aluminium- (links) und Kupferverbindungen (rechts) mit einer bzw. zwei parallel angeordneten Schweißnähten sowie den Prozessparametersätzen P1 bis P4; je Diagramm $s_M = 9$

5.3 Thermische Belastung der Kontaktstelle

5.3.1 Allgemeines

Die thermische Belastung der Kontaktstellen während des Schweißprozesses spielt eine wesentliche Rolle bei der elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen. Werden zulässige Grenztemperaturen in der Batteriezelle überschritten, kann diese geschädigt werden (vgl. dazu Abschnitt 2.2.3 und 2.2.5). Daher ist es das Ziel dieses Abschnitts, für die Werkstoffe Aluminium und Kupfer die Schweißparameter bzw. die Schweißstrategie mit der geringsten thermischen Beeinflussung der Kontaktstelle aufzuzeigen. Dazu wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation Untersuchungen durchgeführt. Dabei ist die Temperaturbelastung der Zellbestandteile in hohem Maße von der Geometrie der Zellpole und der Zelleiter sowie von ihren Werkstoffen abhängig. Um den Einfluss unterschiedlicher Schweißparameter und Schweißstrategien ermitteln zu können, wurden die folgenden Untersuchungen an einer vereinfachten Probenge-

ometrie, der Scherzugprobe, durchgeführt. Dazu wurden in einem ersten Schritt Proben mit drei Schweißstrategien artgleich gefügt und hinsichtlich der Wärmebringung in Abhängigkeit von der erzeugten Anbindungsfläche einander gegenübergestellt. In einem zweiten Schritt wurden Methoden dargelegt, wie die thermische Belastung beim Laserstrahlschweißen reduziert und gleichzeitig eine hohe elektrische Leitfähigkeit erzielt werden kann.

5.3.2 Temperaturänderung in Abhängigkeit von der Anbindungsfläche

Die Temperaturänderung der Proben wurde mittels Thermoelementen im Fernfeld der Schweißnaht gemessen (vgl. dazu **Abbildung 4-1** auf S. 54). Die thermische Belastung der Kontaktstelle während des Schweißprozesses wurde mit Hilfe der maximalen Temperaturänderung der Messstelle ermittelt. Die temperaturempfindlichen Komponenten einer Lithium-Ionen-Zelle liegen nicht unmittelbar neben der Schweißnaht. Deshalb wurde für die folgenden Versuche ein Abstand zwischen Schweißnaht und Messstelle von $x_m = 20$ mm gewählt, um die Bedingungen bei der elektrischen Kontaktierung von Batteriezellen nachzustellen.

Für die folgenden Untersuchungen wurden drei Schweißstrategien eingesetzt, um variierende Anbindungsflächen A_S zwischen 2 und 90 mm² zu erzeugen. Es wurden dafür *linienförmige Schweißnähte*, *Steppnähte* sowie *Schweißpunkte* zur elektrischen Kontaktierung betrachtet. Die Anbindungsfläche wurde anhand der folgenden Parameter variiert:

- Linienförmige Schweißnähte: Schweißnahtlänge l_s
- Steppnähte: Anzahl der Steppnähte n_{Stepp}
- Schweißpunkte: Anzahl der Schweißpunkte n_{Punkte}

Anhand von Parameterstudien wurden zunächst geeignete Prozessparameter ermittelt. Beim Fügen mehrerer Schweißpunkte bzw. Steppnähte wurde insbesondere auf eine gleichmäßige Ausbildung der Anbindungsfläche geachtet. Beim Kupferschweißen von Punkten musste dafür die Energieeinbringung zusätzlich durch eine variierende Anzahl an Überfahrten pro Schweißpunkt angepasst werden. Um den Tiefschweißprozess mit Ausbildung einer Dampfkapillare zu initiieren, waren mehrere Überfahrten ($n_{Rep} = 12$) bei dem ersten Schweißpunkt erforderlich. Beim zweiten Schweißpunkt wurde die Anzahl der Überfahrten auf $n_{Rep} = 8$ reduziert. Die restlichen Schweißpunkte konnten mit $n_{Rep} = 3$ geschweißt werden. Die verwendeten Prozessparametersätze der Schweißpunkte (bezeichnet mit P5, P7) bzw. der Steppnähte (bezeichnet mit P6, P8) sind in **Tabelle 5-2** zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Prozessparametersätze zur elektrischen Kontaktierung mit Schweißpunkten und Steppnähten für die Werkstoffe EN AW-1050A (P5, P6) und EN CW-008A (P7, P8)

| Prozessparameter | P5 | P6 | P7 | P8 |
|--|------|------|--------|-------|
| Laserleistung P_L in kW | 2,4 | 2,0 | 3,0 | 3,0 |
| Vorschubgeschwindigkeit v_L in m/min | 4,8 | 2,0 | 2,4 | 1,5 |
| Streckenenergie S_L in kJ/m | 30,0 | 60,0 | 75,0 | 120,0 |
| Radius der Strahloszillation r_{OSZ} in mm | - | 0,5 | - | 0,5 |
| Frequenz der Strahloszillation f in Hz | - | 200 | - | 350 |
| Anzahl der Überfahrten n_{Rep} | 1 | - | 12/8/3 | - |
| Radius der Schweißpunkte r_{Punkt} in mm | 0,7 | - | 0,8 | - |
| Länge der Steppnähte l_{Stepp} in mm | - | 2 | - | 2 |
| Abstand der Punkte bzw. Steppnähte a_y in mm | 3,5 | 2,0 | 3,5 | 2,0 |

In **Abbildung 5-8** werden die mittels Schweißpunkten (Strategie a) bzw. c)) und Steppnähten (Strategie b) bzw. d)) gefügten Kontakte gezeigt.

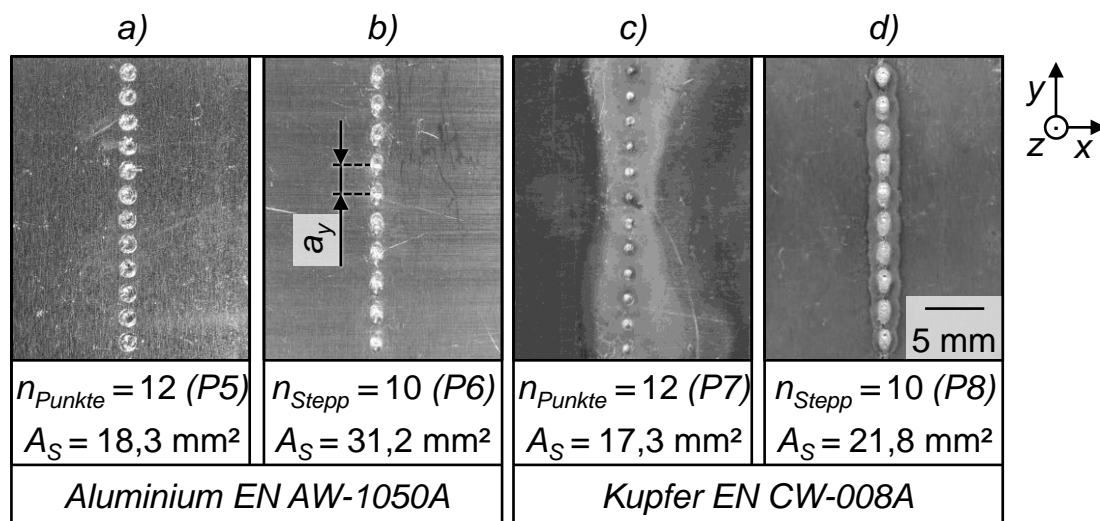


Abbildung 5-8: Proben zur Untersuchung der thermischen Belastung bei unterschiedlichen Schweißstrategien; a) Schweißpunkte (P5), b) Steppnähte (P6), c) Schweißpunkte (P7) und d) Steppnähte (P8)

Eine Darstellung der linienförmigen Schweißnähte kann **Abbildung 5-6** entnommen werden. Die Schweißungen wurden jeweils in der Mitte des Fügebereichs (x-Richtung) positioniert. Wurden mehr als 12 Schweißpunkte bzw. 10 Steppnähte geschweißt, sind diese in einer zweiten Reihe mit einem Abstand von 2 mm in x-Richtung angeordnet. Die Ergebnisse dieser experimentellen Studie sind in **Abbildung 5-9** dokumentiert.

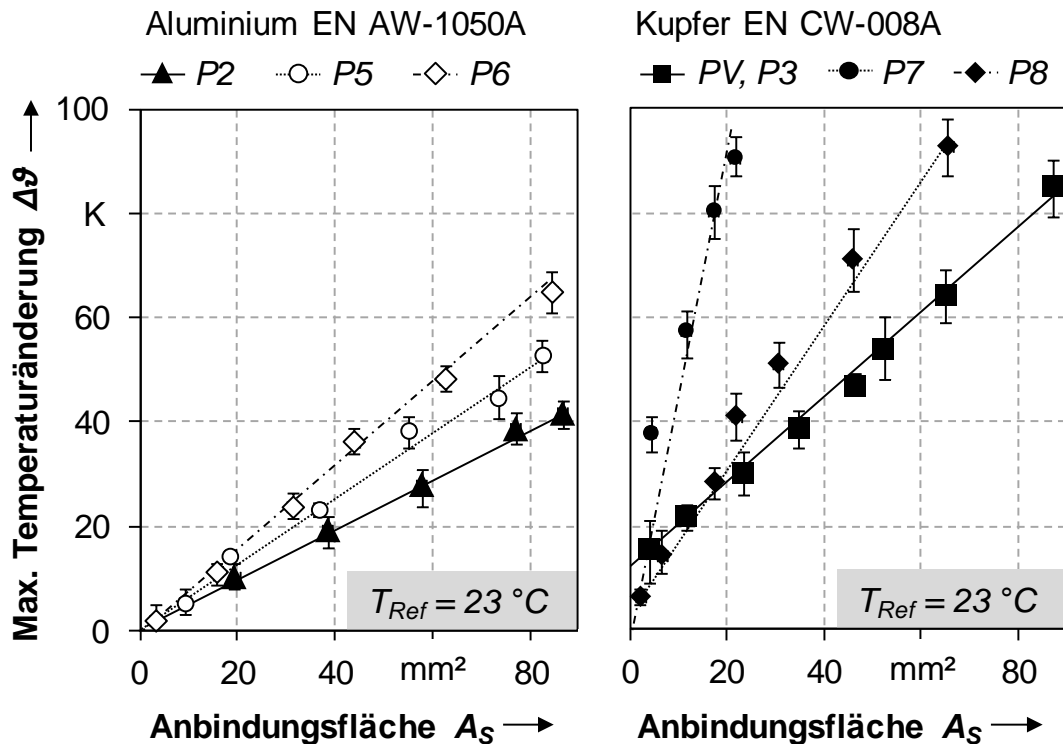


Abbildung 5-9: Vergleich der maximalen Temperaturänderungen beim Laserstrahlschweißen in Abhängigkeit von der erzeugten Anbindungsfläche für die Werkstoffe EN AW-1050A (links) und EN CW-008A (rechts); Schweißstrategien: Linie (P2, PV, P3), Schweißpunkte (P5, P7) und Steppnähte (P6, P8); Aluminium: $s_M = 51$, Kupfer: $s_M = 60$

Für beide Werkstoffe kann ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der maximalen Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ im Fernfeld der Schweißnaht und der Anbindungsfläche A_S nachgewiesen werden. Für die Aluminiumverbindungen wird mit linienförmigen Schweißnähten die geringste auf die Anbindungsfläche bezogene thermische Belastung erreicht. Vergleichbare Anbindungsflächen mittels Schweißpunkten erfordern eine große Anzahl an einzelnen Punkten, was mit einer höheren kumulierten Energieaufnahme und somit einer größeren thermischen Belastung verbunden ist. Bei der Anwendung von Steppnähten wurde ein noch

höherer thermischer Wärmeeintrag beobachtet. Dies kann mit der vergleichsweise hohen Streckenenergie von $S_L = 60 \text{ kJ/m}$ begründet werden und wird benötigt, um eine prozesssichere Ausbildung der Dampfkapillare beim Start des Tieferschweißvorgangs zu gewährleisten.

Beim Fügen der Kupferverbindungen treten im Vergleich zu den Aluminiumverbindungen deutlich höhere maximale Temperaturänderungen an der Messstelle auf. Dies liegt zum einen an der höheren Wärmeleitfähigkeit des Kupfers, die den Wärmetransport zwischen Schweißnaht und Messstelle beeinflusst. Zum anderen muss annähernd die doppelte Streckenenergie ($S_L = 90 \text{ kJ/m}$) aufgewendet werden, um linienförmige Schweißnähte prozesssicher zu fügen. Zudem wird die Schweißnaht vorgewärmt (vgl. Abschnitt 5.2.1). Dabei steigt das Temperaturniveau bereits vor dem Schweißprozess an der Messstelle um ca. 7 K an. Bei Steppnähten werden ebenfalls sehr hohe Streckenenergien von $S_L = 120 \text{ kJ/m}$ eingesetzt, um die geringe Absorption der Laserstrahlung sowie die hohe Wärmeleitfähigkeit des Kupferwerkstoffs zu kompensieren (vgl. Abschnitt 2.3.5). Bis zu einer Anbindungsfläche von ca. 18 mm^2 ist diese Schweißstrategie für eine geringe thermische Belastung am besten geeignet. Werden höhere Anbindungsflächen gefordert, erweist sich für diese Versuchsgeometrie die linienförmige Schweißnaht als vorteilhaft. Bei Schweißpunkten erklären die benötigten Streckenenergien von 75 kJ/m in Verbindung mit mehrfachen Überfahrten die vergleichsweise sehr hohe thermische Belastung.

5.3.3 Ansätze zur Reduzierung der thermischen Belastung

Damit die thermische Belastung der Kontaktstelle während des Fügeprozesses niedrig gehalten werden kann, gilt es, grundsätzlich eine begrenzte Anbindungsfläche mit möglichst geringer Streckenenergie herzustellen. Gleichzeitig soll der Kontakt eine hohe Funktionalität, also eine geringe Kontaktgütemaßzahl ($k_u \leq 1,0$) aufweisen. Für Aluminium gelingt dies, wenn Schweißpunkte oder Steppnähte zur elektrischen Kontaktierung eingesetzt werden. Falls diese in y-Richtung im Fügebereich verteilt werden (vgl. **Abbildung 5-8 a)** und **b)**), liegt eine annähernd homogene Stromdichteverteilung vor. Zwischen den Schweißpunkten bzw. Steppnähten wird der Strompfad nur geringfügig eingeschnürt, so dass die elektrischen Verluste zu vernachlässigen sind. Dadurch lässt sich die Anbindungsfläche im Vergleich zu einer linienförmigen Naht bei annähernd gleicher Kontaktgütemaßzahl reduzieren. In der Summe sind deshalb Schweißpunkte und Steppnähte den durchgehend linienförmigen Schweißnähten überle-

gen (vgl. **Abbildung 5-10**). Dies ist ein entscheidender Gewinn für den weiteren Verlauf der Arbeit. Durch eine gezielte Anordnung der Schweißpunkte kann ein Kontakt hinsichtlich elektrischer, mechanischer oder einer Kombination beider Anforderungen methodisch ausgelegt werden (siehe Kapitel 6).

Werden Schweißpunkte zur Kontaktierung von Kupferverbindungen verwendet, resultieren ebenfalls geringe Kontaktgütemaßzahlen bei kleiner Anbindungsfläche. Dennoch überwiegt die thermische Belastung im Verhältnis zur Funktionalitätsverbesserung aufgrund der erforderlichen hohen Streckenenergie beim Punktschweißen. Die geringste maximale Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ wird erzielt, wenn Kontakte mit sehr dünnen Schweißlinien ($b_s < 0,5$ mm) gefertigt werden. Mit einer Schweißnahtbreite von $b_s = 0,23$ mm und $l_s/l_{ii} = 1$ wird eine Kontaktgütemaßzahl von $k_u = 1,04$ erreicht. $\Delta\vartheta$ beträgt in diesem Fall lediglich 23 K. Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, sind in **Abbildung 5-10** die maximalen Temperaturänderungen von Aluminium- und Kupferverbindungen einander gegenübergestellt. Diese Proben weisen eine Kontaktgütemaßzahl von $k_u \approx 1,0$ auf. Jedoch werden für jede Schweißstrategie unterschiedlich große Anbindungsflächen benötigt, wodurch sich unterschiedliche thermische Belastungen ergeben. Dies ist in **Abbildung 5-10** ersichtlich.

5.4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Untersuchungen konnten die Einflussgrößen bei der elektrischen Kontaktierung auf die Kontaktgütemaßzahl sowie die thermische Belastung der Kontaktstelle ermittelt werden. Die erarbeiteten Erkenntnisse werden im Folgenden zusammengefasst und gelten für die untersuchte Probengeometrie (Scherzugprobe nach DIN EN ISO 14273):

- Das Verhältnis von Schweißnahtlänge zu Probenbreite sollte bei einer Scherzugprobe zu $l_s/b = 1,0$ gewählt werden. Dadurch fließt der Strom über die gesamte Breite der Probe und ein Einschnüren der Stromlinien entlang der Probenbreite wird vermieden. Dies stellt den signifikantesten Einfluss auf die Kontaktgütemaßzahl dar.
- Die Schweißnahtbreite hat hingegen einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Kontaktgütemaßzahl. Falls $l_s/b = 1,0$ erfüllt wird, folgt für linienförmige Schweißnähte eine berechnete Kontaktgütemaßzahl von $k_u < 1,0$. Durch eine geringe Schweißnahtbreite wird die Anbindungsfläche zwar reduziert, jedoch liegt ein durchgängig homogener Stromlinienverlauf vor.

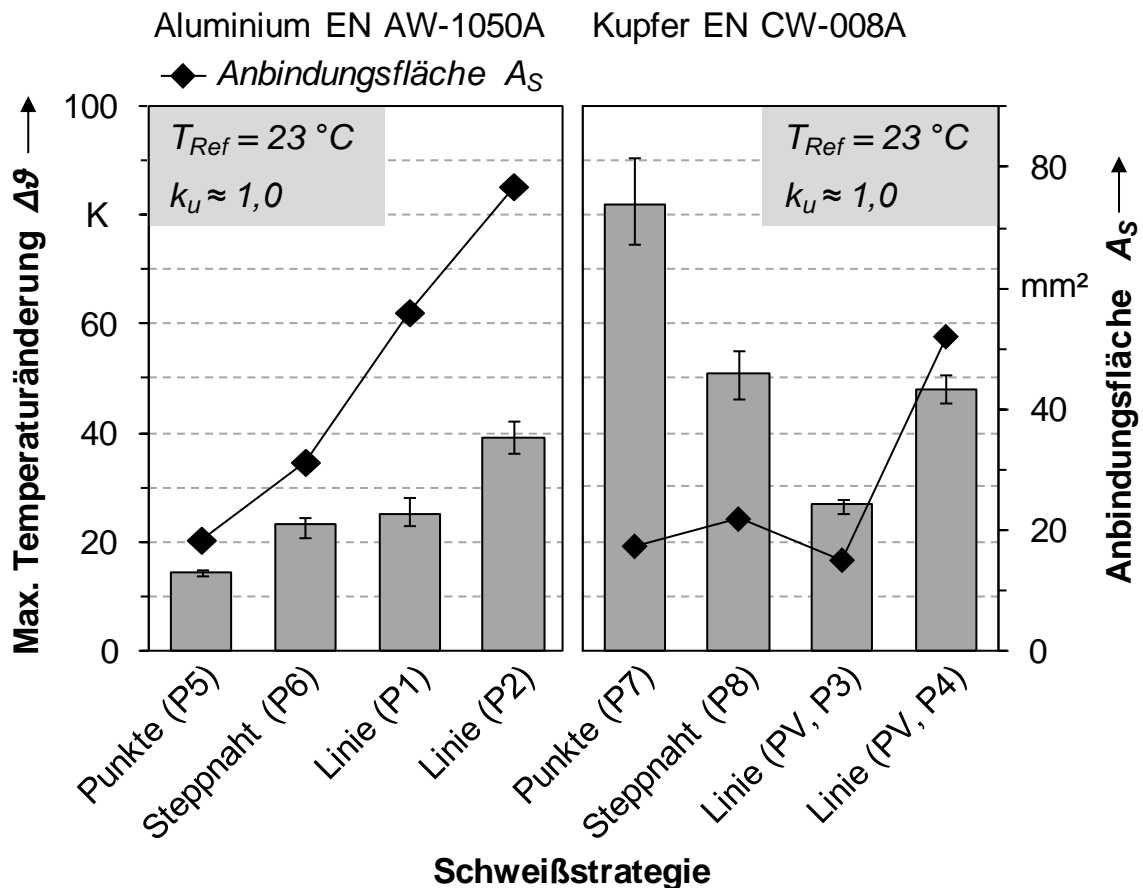


Abbildung 5-10: Vergleich der maximalen Temperaturänderung $\Delta\theta$ und der Anbindungsflächen A_S von Aluminium- (links) und Kupferproben (rechts) für $k_u \approx 1,0$, welche durch unterschiedliche Schweißstrategien gefügt wurden; Prozessparametersätze P1 bis P4 aus Tabelle 5-1 und P5 bis P8 aus Tabelle 5-2; je Diagramm $s_M = 12$; Darstellung der Schweißnahtgeometrien in den Abbildungen 5-6 und 5-8

- Durch zwei parallele Schweißnähte mit möglichst großem Abstand zueinander kann die ideale Kontaktgütemaßzahl ($k_u = 0,5$) annähernd erreicht werden (Aluminium: $k_u = 0,55$, Kupfer: $k_u = 0,57$). In diesem Fall wird der gesamte Leiterquerschnitt innerhalb des Fügebereichs zur Stromübertragung genutzt.
- Für Aluminiumverbindungen kann mittels Schweißpunkten und Steppnähten eine hohe elektrische Leitfähigkeit bei gleichzeitig geringer thermischer Belastung erzielt werden. Dies stellt einen entscheidenden Gewinn für den weiteren Verlauf dieser Arbeit dar, da eine geometrische Verteilung dieser Schweißpunkte bzw. dieser Steppnähte zur Auslegung elektrischer Kontakte eingesetzt werden kann (siehe Kapitel 6).

- Für Kupferverbindungen erweist sich die linienförmige Schweißnaht als am besten geeignet, um Verbindungen mit einer Kontaktgütemaßzahl von $k_u \approx 1,0$ und einer geringen thermischen Belastung herzustellen.

Im folgenden Kapitel 6 werden die bisherigen Erkenntnisse auf beliebige Kontaktgeometrien übertragen. Hierzu reichen experimentelle Untersuchungen an einer einfachen Probengeometrie nicht mehr aus. Daher wird eine Methode vorgestellt, welche es mit Hilfe der FEM-Simulation und einem Optimierungsverfahren ermöglicht, Schweißnahtgeometrien mit begrenzter Anbindungsfläche zu berechnen, die dennoch Kontakte mit hoher elektrischer Leitfähigkeit herzustellen erlauben.

6 Methode zur simulationsgestützten Auslegung elektrischer Kontakte

6.1 Allgemeines

Werden zwei elektrische Leiter in einer Überlappkonfiguration gefügt, dann wird im Regelfall die Zielsetzung verfolgt, einen Kontakt mit einem möglichst kleinen elektrischen Widerstand herzustellen. Beim Laserstrahlschweißen der elektrischen Verbindungen von Lithium-Ionen-Zellen ist die realisierbare Anbindungsfläche aufgrund der thermischen Belastung der Kontaktstelle begrenzt (vgl. Abschnitt 5.3). Mit zunehmender Anbindungsfläche steigt der thermische Energieeintrag und somit die maximale Temperaturänderung der Kontaktstelle (vgl. Abschnitt 5.3.2). Dabei ist die maximal erlaubte Anbindungsfläche in großem Maße von der Geometrie der Ableiter sowie der Anbindung der Kontakte an die Lithium-Ionen-Zelle abhängig, da diese Faktoren die Temperaturverteilung an den wärmeempfindlichen Zellkomponenten entscheidend beeinflussen. Um dennoch einen möglichst hoch leitfähigen elektrischen Kontakt herzustellen, muss durch eine zielgerichtete geometrische Verteilung der Anbindungsfläche der elektrische Widerstand optimiert werden. Für diese Aufgabenstellung wird in diesem Kapitel eine Methode vorgestellt. Als Schweißstrategie werden für die grundlegenden Überlegungen Schweißpunkte eingesetzt. Das Vorgehen wird zudem auf die Auslegung eines Kontaktes unter Berücksichtigung einer statischen mechanischen Last erweitert.

Zu Beginn wird die Problemstellung für die elektrische und mechanische Auslegung formuliert. Im Anschluss wird die Methode zur simulationsgestützten Auslegung elektrischer Kontakte vorgestellt. Diese basiert auf einem Optimierungsalgorithmus, der die geometrische Verteilung der geschweißten Anbindungsfläche, also das Schweißnahtmuster, hinsichtlich elektrischer und mechanischer Zielgrößen optimiert. Um die elektrischen und mechanischen Kontakteigenschaften zu bestimmen, wird der Algorithmus mit thermoelektrischen und elastomechanischen FEM-Simulationsmodellen gekoppelt. Inhalte zur elektrischen Optimierung laserstrahlgeschweißter Kontakte wurden teilweise bereits in (SCHMIDT ET AL. 2014) veröffentlicht.

6.2 Beschreibung der Optimierungsmethode

6.2.1 Optimierungsaufgabe

Die Optimierungsaufgabe ist wie folgt charakterisiert: Zwei elektrische Leiter sollen mit einer konstanten Anbindungsfläche in einer beliebigen Überlappverbindung stoffschlüssig gefügt werden. Innerhalb eines geometrischen Definitionsbereichs wird die Anbindungsfläche mittels einzelner Schweißpunkte verteilt. Die Anbindungsfläche wird mit der Anzahl an Schweißpunkten n_i sowie dem Radius r_{punkt} der Kreisfläche eines Schweißpunktes festgelegt. Die zu beschreibende Optimierungsaufgabe kann in zwei Fälle unterschieden werden. Um diese mit möglichst wenigen Einschränkungen zu erläutern, wird eine asymmetrische Kontaktgeometrie (vgl. **Abbildung 6-1**) verwendet. Im Hinblick auf den elektrischen Verbindungswiderstand werden die einzelnen Schweißpunkte so verteilt, dass die Potenzialdifferenz zwischen zwei beliebig gewählten Messpunkten U_1 und U_2 außerhalb des Definitionsbereichs bei einer Strombelastung I_0 minimiert wird (siehe **Abbildung 6-1 a**). Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften werden die Schweißpunkte so positioniert, dass unter einer statischen Last \vec{F} die maximalen elastomechanischen Spannungen σ_{max} innerhalb des Definitionsbereichs minimiert werden, siehe **Abbildung 6-1 b**.

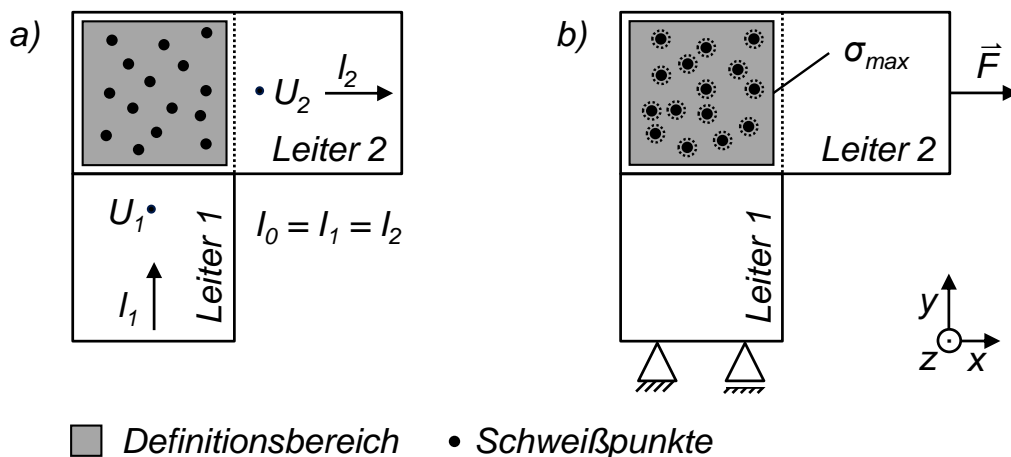


Abbildung 6-1: Prinzipdarstellung einer Kontaktierung von zwei rechteckigen Leiterstreifen in einer Überlappverbindung mit zufällig gewählter Verteilung von Schweißpunkten ($n_i = 15$) innerhalb eines Definitionsbereichs; Betrachtung der Schweißnahtkonfiguration hinsichtlich a) elektrischer Eigenschaften und b) mechanischer Eigenschaften

6.2.2 Lösung der Optimierungsaufgabe

Das Optimierungsproblem wird mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus gelöst, der mit numerischen Berechnungen der elektrischen und mechanischen Eigenschaften gekoppelt ist. Als Optimierer wird ein genetischer Algorithmus (vgl. Abschnitt 2.5.2) verwendet. Dieser bietet in der vorliegenden Anwendung gegenüber anderen Optimierungsansätzen zum einen den Vorteil, dass eine Optimierung ohne Vorwissen einer möglichen Lösung erfolgen kann. Zum anderen können Lösungen, also unterschiedliche Schweißpunktverteilungen, quantitativ hinsichtlich einer oder mehrerer Zielgrößen verglichen werden. Zudem wird, im Gegensatz zu beispielsweise gradientenbasierten Suchverfahren, durch zufällig mutierte Lösungen innerhalb des gesamten Lösungsraums ein Abbruch der Optimierung aufgrund lokal auftretender Minima umgangen (SALOMON 1998, S. 46).

Bei dieser Anwendung stellen die Potenzialdifferenz an den gewählten Messpunkten U_1 und U_2 sowie die maximale elastomechanische Spannung σ_{max} die Zielgrößen der Optimierung dar. Eine Zielfunktion fasst die Zielgrößen in gewichteter Form zusammen, sodass ein kombinierter Zielfunktionswert Z berechnet werden kann. Die Zielgrößen werden mit Hilfe von Simulationsmodellen unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet und an den Optimierungsalgorithmus übergeben. Der detaillierte Ablauf der Optimierung ist in **Abbildung 6-2** dokumentiert und wird im Folgenden erläutert.

Entsprechend Abschnitt 2.5 werden die üblichen Begriffe beim Einsatz von evolutionären Algorithmen auf die vorliegende Problemstellung übertragen. Das bedeutet, dass einzelne Lösungen künftig als *Individuen* I_j bezeichnet werden. Jedes Individuum beinhaltet sogenannte *Gene*. Im vorliegenden Fall sind das Informationen zu der Anzahl, der Größe und der Position der Schweißpunkte. Die Gesamtanzahl n_p der Individuen wird Populationsgröße genannt (siehe **Tabelle 6-1**).

Zu Beginn der Optimierung wird eine erste Generation an n_p Individuen zufällig erzeugt, die sogenannte Anfangspopulation. Dieser Schritt wird als Initialisierung bezeichnet. Anschließend wird für die vorliegenden Individuen eine Fitness, eine Ergebnisqualität, berechnet und zugewiesen. Dazu wird für jedes Individuum ($j=1$ bis $j \leq n_p$) ein Simulationsmodell aufgebaut, um die gesuchten Zielgrößen zu berechnen. Bei der Bewertung der elektrischen Eigenschaften wird eine

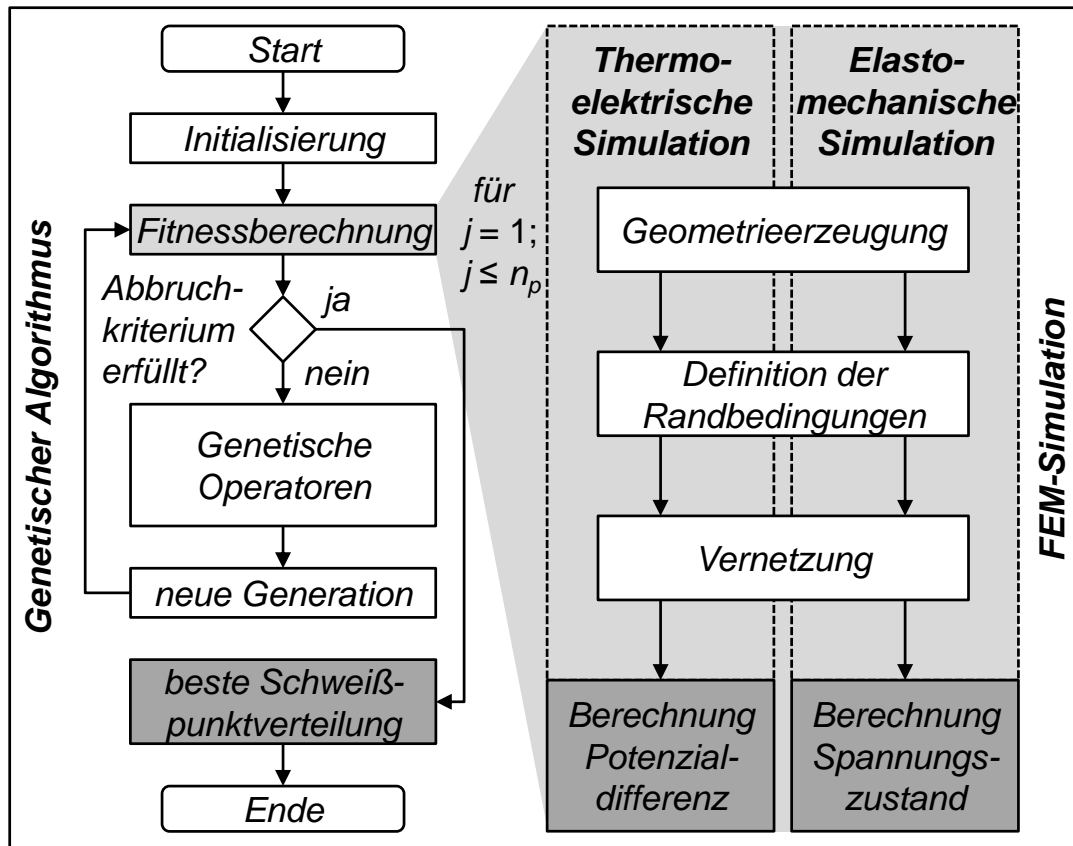


Abbildung 6-2: Ablauf der Optimierung und Darstellung der Kopplung von genetischem Algorithmus und FEM-Simulation

thermoelektrische FEM-Simulation durchgeführt. Im Fall der Bewertung der mechanischen Eigenschaften wird eine elastomechanische FEM-Simulation durchgeführt, wobei der Spannungszustand jedes Individuums berechnet wird. Sollen bei der Optimierung sowohl elektrische als auch mechanische Eigenschaften berücksichtigt werden, sind beide Modelle aufzubauen und zu lösen. Die thermoelektrische und die elastomechanische Modellierung werden jeweils in den Abschnitten 6.3.2 sowie 6.4.2 detailliert beschrieben. Grundsätzlich werden zur Modellierung die folgenden Schritte durchlaufen:

- Geometrieerzeugung: Implementierung der Schweißpunkte
- Definition der Randbedingungen
- Vernetzung der Bauteile

Liegen alle benötigten Zielgrößen vor, kann der Zielfunktionswert berechnet werden. Anhand dieses Wertes wird nun jedem Individuum eine Ergebnisqualität, die sogenannte Fitness, zugewiesen. Dadurch lassen sich diese vergleichend bewerten. Basierend auf den Fitnesswerten können einzelne Lösungen selektiert, rekombiniert oder mutiert werden. Mit diesen sogenannten genetischen Operato-

ren werden neue Individuen generiert. Diese sogenannten Nachkommen ersetzen die Individuen der Anfangspopulation und bilden eine neue Generation. Wird ein Abbruchkriterium (siehe Abschnitt 6.2.3) erfüllt, liegt das Ergebnis in Form des besten Individuums vor. Tritt dies nicht ein, werden fortlaufend neue Generationen erzeugt.

Tabelle 6-1: Übertragung der Begriffe von evolutionären Algorithmen auf die vorliegende Problemstellung

| Genetischer Algorithmus | Bedeutung im Sinne der vorliegenden Problemstellung |
|--------------------------------|---|
| Gene | x- und y-Koordinaten der Schweißpunkte |
| Individuen I_j | Schweißpunktverteilungen; Lösungen der Optimierungsaufgabe |
| Population | Gesamtheit der Schweißpunktverteilungen |
| Generation n_G | Gesamtheit der Schweißpunktverteilungen zum jeweiligen Entwicklungsstand der Optimierung |
| Fitness eines Individuums | elektrische Potenzialdifferenz oder mechanischer Spannungszustand einer Schweißpunktverteilung oder eine Maßzahl, die beides gewichtet bewertet |

6.2.3 Charakteristik des genetischen Algorithmus

Die Charakteristik bzw. die Parametrierung des GA bildet im Rahmen des hier beschriebenen Ansatzes den Kern bei der Lösung des Optimierungsproblems. Sie musste problemspezifisch angepasst werden. In den folgenden Ausführungen wird zunächst auf die *Kodierung* sowie die *Initialisierung* des GA eingegangen. Im Anschluss werden die Variante der *Fitnesszuweisung*, der *Selektion* und *Reproduktion* sowie das *Abbruchkriterium* beschrieben. Die Grundstruktur des GA wurde der *Global Optimization Toolbox* der Entwicklungsumgebung *Matlab* entnommen und durch eigene Funktionsumfänge erweitert.

Kodierung und Initialisierung

Jeder Schweißpunkt eines Individuums ist durch eine x- und eine y-Koordinate beschrieben. Diese entsprechen den Optimierungsvariablen, den sogenannten *Genen* des GA und werden in Form eines Doppelvektors der Länge $2 \cdot n_i$ kodiert (siehe **Abbildung 6-3**). Der Radius des Schweißpunktes wird als konstant angenommen ($r_{\text{Punkt}} = \text{konst.}$).

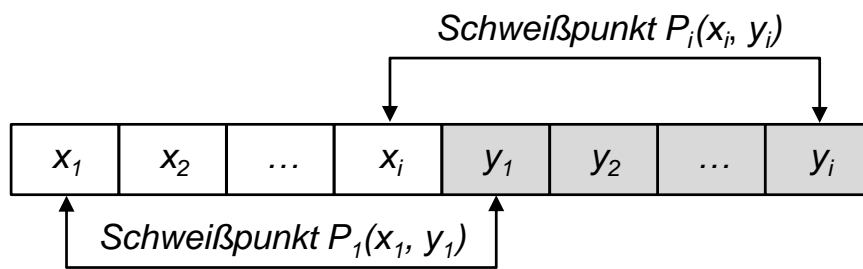


Abbildung 6-3: Definition des Doppelvektors der Länge $2 \cdot n_i$ zur Kodierung der Gene eines Individuums mit i Schweißpunkten

Bei der Initialisierung werden für jedes Individuum die Schweißpunkte P_i zufällig innerhalb eines Suchraums, im Definitionsbereich, in der xy -Ebene positioniert. Der Definitionsbereich wird durch die Grenzen x_L , x_H , y_L und y_H festgelegt:

$$x_i \in [x_L + r_{\text{Punkt}}, x_H - r_{\text{Punkt}}] \quad \text{und} \quad y_i \in [y_L + r_{\text{Punkt}}, y_H - r_{\text{Punkt}}] \quad (6-1)$$

Nachdem die Koordinaten der Schweißpunkte vorliegen, wird überprüft, ob ausreichende Abstände zwischen allen Schweißpunkten vorhanden sind oder eine Überlappung gegeben ist. Um eine robuste und fehlerfreie Vernetzung bei der FEM-Modellierung zu gewährleisten, müssen die Schweißpunkte entweder direkt aneinander liegen oder der Abstand a zwischen den Schweißpunkten muss größer oder gleich der minimalen Elementkantenlänge l_m des Simulationsmodells sein. Dies wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels detailliert erläutert und begründet (vgl. dazu Abschnitt 6.3.2 und 6.4.2).

Im Fall einer Überlappung einzelner Schweißpunkte ($a < 0$ für ein oder mehrere Paare) werden diese mittels einer Korrekturfunktion paarweise entlang ihrer Mittelachse auseinander bewegt und aneinander gesetzt ($a = 0$). Ist der Abstand kleiner als die minimale Elementkantenlänge ($0 < a < l_m$), werden die Schweißpunkte ebenfalls entlang ihrer Mittelachse verschoben, bis die Bedingung $a = l_m$ erfüllt wird. Diese Korrekturmaßnahmen werden in **Abbildung 6-4** veranschaulicht. Ist dies nicht umsetzbar, weil die Grenzen des Definitionsbereichs oder der Mindestabstand zu umliegenden Schweißpunkten nicht eingehalten werden können, wird das Individuum als ungültig deklariert und ein neues generiert. Diese Kontroll- bzw. Korrekturmaßnahme wird bei jedem neu erstellten Individuum durchgeführt.

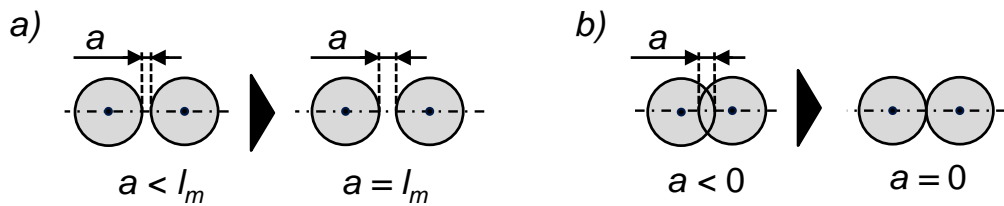


Abbildung 6-4: Maßnahmen zur Gewährleistung einer robusten und fehlerfreien FEM-Vernetzung der Schweißpunkte: a) Einhaltung der minimalen Elementkantenlänge l_m ; b) Verschiebung bei sich überlappenden Schweißpunkten

Fitnesszuweisung

Wie bereits in Abschnitt 2.5.2 auf S. 32 beschrieben, wird die Fitness durch eine reihenfolgenbasierte Fitnessfunktion zur Bewertung der Individuen verwendet. Diese Variante der Fitnesszuweisung erwies sich als besonders gut geeignet, da die berechneten Zielfunktionswerte bei bereits fortgeschrittenem Optimierungsverlauf nur geringfügige Unterschiede aufwiesen und so gleichmäßig innerhalb der Population skaliert werden konnten. Somit konnte eine frühzeitige Konvergenz der Zielfunktion vermieden werden.

Selektion und Reproduktion

Zur Selektion der Individuen wurden die Selektionsverfahren Elitismus und Turnirselektion verwendet (siehe Abschnitt 2.5.2 auf S. 33). Bei der Turnirselektion werden diejenigen Individuen, die zur Reproduktion verwendet werden sollen, gleichmäßig und zufällig innerhalb der Population ausgewählt. Der Selektionsdruck, also die Wahrscheinlichkeit der Auswahl des besten Individuums innerhalb einer Population, kann durch die Anzahl der Turnierteilnehmer n_t gesteuert werden. Dies ermöglicht eine nachvollziehbare und verhältnismäßig einfache Steuerung des Konvergenzverhaltens des GA und wurde deshalb für die folgenden Problemstellungen ausgewählt. Beim Elitismus werden die besten n_E Individuen direkt in die nächste Generation übernommen.

Für die Reproduktion von Individuen wird hier die diskrete Rekombination (vgl. **Abbildung 2-17** auf S. 34) eingesetzt. Diese Variante der Rekombination vertauscht oder belässt die Gene von zwei Eltern (Elter 1 und Elter 2) rein zufällig. Das Schema der diskreten Rekombination wird in **Abbildung 6-5** am Beispiel von zwei ausgewählten Schweißpunkten veranschaulicht.

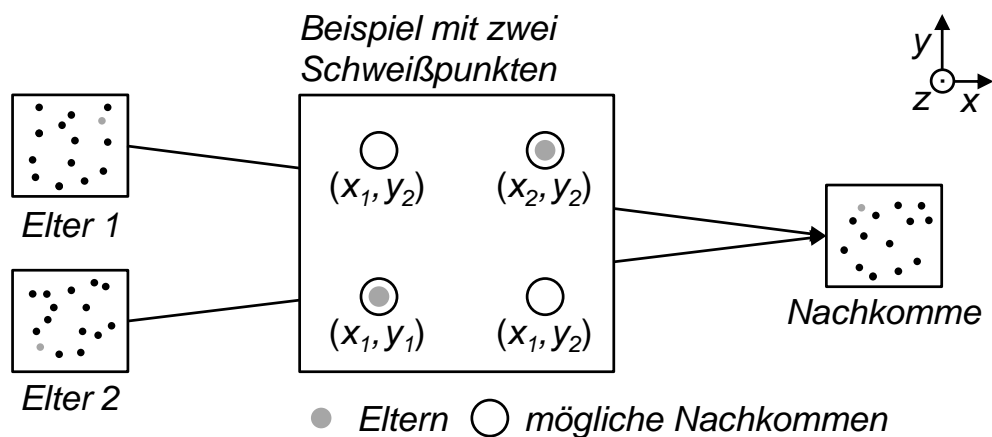


Abbildung 6-5: Schema der diskreten Rekombination am Beispiel von zwei ausgewählten Schweißpunkten

Durch den Tausch der x - bzw. y -Koordinaten können vier neue Positionen generiert werden, die innerhalb eines Quadrats angeordnet sind. Welche dieser Positionen der neue Schweißpunkt einnimmt, wird, wie bereits erwähnt, zufällig bestimmt. Dazu wird ein in Matlab implementierter Zufallsgenerator eingesetzt, um den Doppelvektor des Nachkommens mit den Variablen der Eltern aufzufüllen. Überträgt man dieses Schema auf die Gesamtzahl an Schweißpunkten, kann eine Vielzahl an neuen Schweißpunktverteilungen erzeugt werden. Der Informationsgehalt innerhalb der Population wird dabei jedoch nicht erweitert. Die auf diese Weise neu erstellten Nachkommen werden analog zu den initialisierten Individuen daraufhin überprüft, ob die Bedingungen für eine robuste Vernetzung eingehalten werden. Sind die Bedingungen nicht erfüllt, greift die Korrekturfunktion ein und verschiebt die Schweißpunkte (vgl. **Abbildung 6-4**) oder deklariert ein kritisches Individuum als ungültig, sodass ein neues Individuum erzeugt werden muss. Ein gültiges Individuum kann anschließend in die nächste Generation übernommen werden.

Zur Reproduktion von Individuen durch Mutation wurde die uniforme Mutation (vgl. Abschnitt 2.5.2 auf S. 35) implementiert. Jedes Gen eines Individuums wird dabei mit der Mutationsrate r_m variiert. Die neu zugewiesenen Werte werden zufällig innerhalb der Grenzen des Definitionsbereichs (vgl. Gleichung (6-1)) gewählt. Dabei werden die veränderten x - und y -Koordinaten des kodierten Doppelvektors (vgl. **Abbildung 6-3**) durch die neuen Werte ersetzt, wobei ein neues Individuum I_j^s entsteht. Für die Mutationsrate r_m wurde für alle Berechnungen der Wert $1/n_v$ verwendet. n_v ist die Anzahl der Optimierungsvariablen, welche in der vorliegenden Problemstellung der doppelten Anzahl (zwei Koordinaten x_i und y_i) der Individuen n_i entspricht ($n_v = 2 \cdot n_i$).

Damit eine neue Generation $n_G + 1$ erzeugt werden kann, werden alle genetischen Operatoren (Selektion, Rekombination und Mutation) verwendet. Der Anteil an selektierten Individuen, welcher für den Elitismus (P_E), für die Rekombination (P_R) oder für die Mutation (P_M) verwendet wird, kann dabei variiert werden. Diese Aufteilung der genetischen Operatoren zur Erstellung einer neuen Generation steuert das Konvergenzverhalten des Algorithmus und muss jeweils problemspezifisch angepasst werden. Die Anzahl an Individuen, welche für die entsprechenden Operationen selektiert werden, wurde mit den Gleichungen (6-2) und (6-3) in den GA eingebunden:

$$n_E = n_P \cdot P_E; \quad n_R = 2n_P \cdot P_R; \quad n_M = n_P \cdot P_M \quad (6-2)$$

$$P_E + P_R + P_M = 1 \quad (6-3)$$

mit

$n_E; n_R; n_M$: Anzahl der für den Elitismus, die Rekombination und die Mutation ausgewählten Individuen

$P_E; P_R; P_M$: Anteil der neuen Generation, welcher durch Elitismus, Rekombination und Mutation erstellt wird

n_P : Populationsgröße

Der für diese Arbeit verwendete Ablauf des GA wird für die Teilbereiche Selektion und Reproduktion zur Erzeugung einer neuen Generation $n_G + 1$ mit j Individuen in **Abbildung 6-6** schematisch veranschaulicht. Die Populationsgröße n_p bleibt bei der Erstellung einer neuen Generation unverändert.

Abbruchkriterium

Die Optimierung wird bei Erreichen eines Abbruchkriteriums gestoppt. Dazu wird laufend die kumulierte Änderung der Zielfunktionswerte über eine definierte Anzahl z_G an erstellten Generationen berechnet. Wird eine vorgegebene minimale Änderung der Zielfunktionswerte bzw. eine Konvergenzschwelle Z_{stop} unterschritten, wird die Optimierung beendet und die bis dahin beste berechnete Lösung ausgegeben. Für das Abbruchkriterium gilt somit:

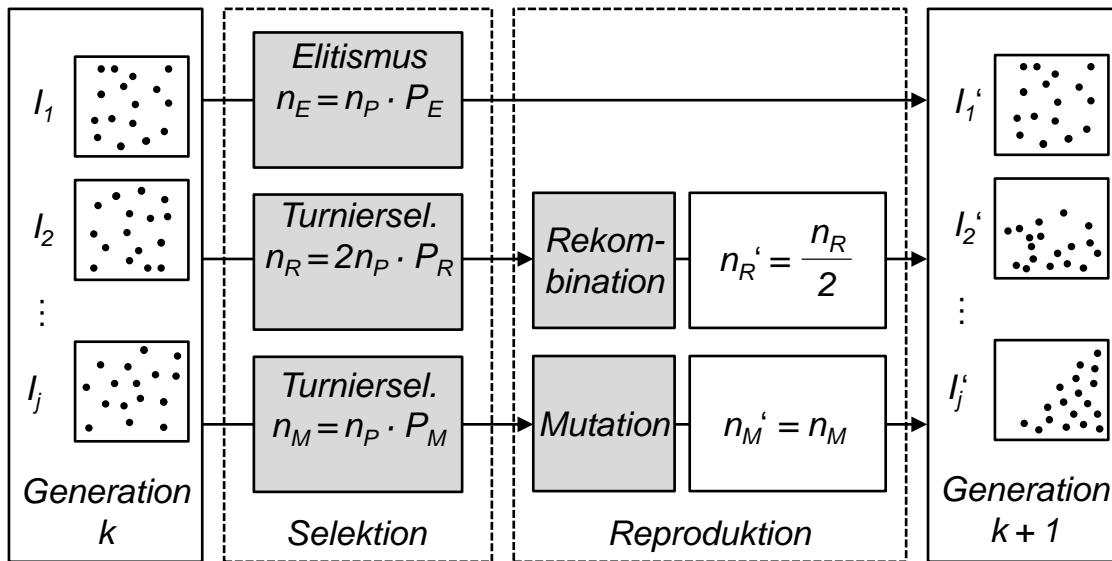


Abbildung 6-6: Ablauf bei der Erzeugung einer neuen Generation mit der Populationsgröße n_P durch den Einsatz von Selektion und Reproduktion (P_E, P_R, P_M : Anteil der neuen Generation, welcher durch Elitismus, Rekombination und Mutation erstellt wird)

$$\sum_{i=1}^{z_G} |Z_{j,k,min} - Z_{j,k+1,min}| \leq Z_{stop} \quad (6-4)$$

mit

- z_G : Anzahl berücksichtigter Generationen
- $Z_{j,k,min}$: Zielfunktionswert des besten Individuums einer Generation k
- Z_{stop} : Konvergenzschwelle

Je nach gewählter Konvergenzschwelle Z_{stop} stellt die beste Lösung des GA nicht zwingend das Optimum der zu lösenden Problemstellung dar. Um dennoch das Optimum zu finden, kann in den Optimierungsprozess eingegriffen werden. Basierend auf vorliegenden Lösungen kann ein mögliches Optimum durch den Benutzer abgeleitet werden. Zur Überprüfung der neuen Lösung wird diese in die letzte berechnete Generation rückgeführt. Das Einführen manuell abgeleiteter Lösungen wird dabei nach POHLHEIM (1999, S. 62) als *erweiterte Initialisierung* bezeichnet.

Im Fall einer Verbesserung des Zielfunktionswerts kann die höhere Güte der neuen Lösung bestätigt werden, sodass von einem Optimum ausgegangen werden kann. Ist ein mögliches Optimum jedoch nicht ersichtlich, oder tritt bei dem

vermuteten Optimum keine Verbesserung des Zielfunktionswerts ein, muss das Abbruchkriterium angepasst werden, sodass weitere Lösungen durch den GA generiert werden können. Schematisch wird dieser Ablauf in **Abbildung 6-7** gezeigt.

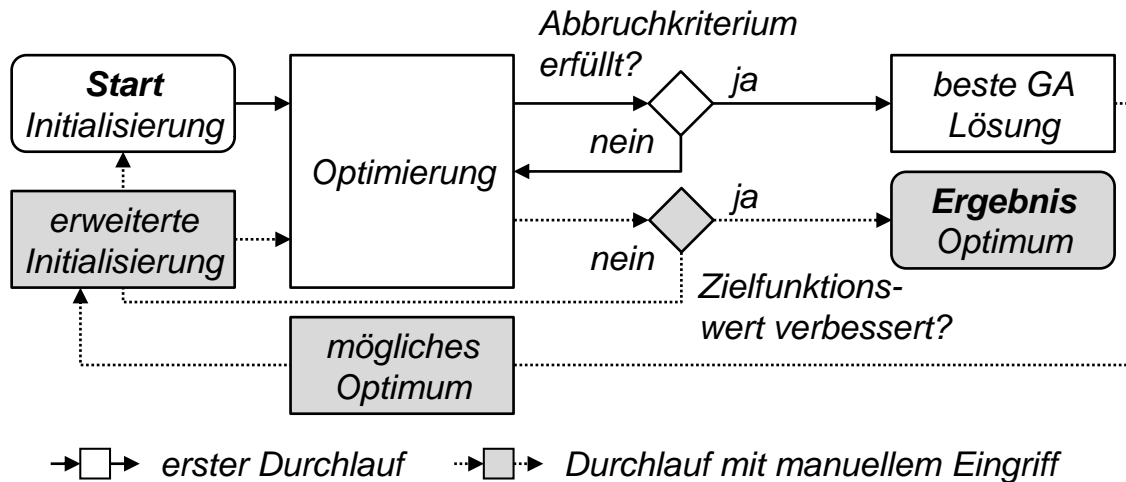


Abbildung 6-7: Integration der erweiterten Initialisierung in den Optimierungsablauf

6.3 Optimierung der elektrischen Eigenschaften

6.3.1 Definition der Zielfunktion

Zur Bewertung der elektrischen Eigenschaften einer Schweißpunktverteilung wird die Potenzialdifferenz zwischen zwei definierten Stellen außerhalb des Definitionsbereichs herangezogen (vgl. **Abbildung 6-1 a**). Für die Optimierungsaufgabe wird die Zielfunktion als Verhältnis der Potenzialdifferenzen der Schweißpunktverteilung eines Individuums I_j und der idealen Kontaktierung formuliert, wobei der Definitionsbereich der maximal möglichen Anbindungsfläche (Überlappung) entspricht. Anhand des Zielfunktionswerts lässt sich eine generierte Lösung somit direkt mit der idealen Kontaktierung vergleichen und bewerten. Der GA hat die Aufgabe, den Zielfunktionswert $Z_{el,j}$ zu minimieren ($Z_{el,ideal} = 1$). Es gilt:

$$Z_{el,j} = \frac{\Delta U_m}{\Delta U_{ideal}} \quad (6-5)$$

mit

- $Z_{el,j}$: Zielfunktion der elektrischen Optimierung des Individuums j
- ΔU_m : Potenzialdifferenz der Schweißpunktverteilung zwischen den zwei gewählten Messpunkten ($\Delta U_m = U_1 - U_2$)
- ΔU_{ideal} : Potenzialdifferenz des vollflächig kontaktierten Definitionsbereichs über der betrachteten Messstrecke

Der Zielfunktionswert wird anhand von thermoelektrischen Simulationsmodellen berechnet (siehe Abschnitt 6.3.2.). Der genetische Algorithmus übergibt die x- und y-Koordinaten der einzelnen Individuen über eine Schnittstelle von der Entwicklungsumgebung Matlab an die FEM-Software Comsol. Im Anschluss wird jede Schweißpunktverteilung einer Population nacheinander modelliert und die jeweilige berechnete Potenzialdifferenz ΔU_m an den GA zurück gegeben.

Nach der Initialisierung wird eine weitere Kontrollfunktion ausgeführt. Diese hat die Aufgabe, zufällig erzeugte identische Individuen zu identifizieren, sodass der Zielfunktionswert direkt übernommen werden kann, ohne ein Simulationsmodell aufzubauen. Diese Kontrollfunktion vermeidet somit ein mehrfaches Berechnen identischer Individuen und steigert auf diese Weise die Effizienz des Algorithmus. Beispielsweise kann der Zielfunktionswert der Individuen, welche durch den Elitismus ausgewählt wurden, direkt in die nächste Generation übergeben werden.

6.3.2 Thermoelektrische Modellbildung

Zur Modellierung der thermoelektrischen Eigenschaften wird die Software *Comsol Multiphysics 4.3b* unter Verwendung der Module *Conductive Media DC* und *Heat Transfer by Conduction* eingesetzt. Die Schnittstelle zwischen Matlab und Comsol bildet das zusätzliche Modul *LiveLink for Matlab*.

Definition der Randbedingungen

Bei der thermoelektrischen Modellierung wird zunächst die Geometrie der elektrischen Leiter aufgebaut. Jedem Bauteil wird ein Werkstoff zugeordnet. Für die thermoelektrischen Berechnungen werden die elektrische Leitfähigkeit σ , d. h. der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstands ($\sigma = 1/\rho$), der Temperaturbeiwert α_{20} mit der Referenztemperatur der Umgebung T_{Ref} (vgl. Gleichung (4-5) auf S. 60), die Wärmeleitfähigkeit λ sowie die spezifische Wärmekapazität c_p benötigt. Anschließend werden die Randbedingungen des Simula-

tionsmodells festgelegt. Die Position und die Fläche der Stromeinspeisung und des Masse-Anschlusses des elektrischen Systems sowie die Referenztemperatur der Umgebung werden definiert. Daraus ergibt sich die Richtung des Stromflusses. Der Betrag des Prüfstroms I_0 wird über die Stromdichte im Bereich der Stromeinspeisung vorgegeben. Die FEM-Software berechnet nun mit Hilfe der folgenden physikalischen Grundgleichungen das resultierende elektrische Feld \vec{E} (KUEPFMUELLER ET AL. 2013, S. 248 ff.):

$$I_0 = \iint_A \vec{J} d\vec{A} = \sigma \iint_A \vec{E} d\vec{A} \quad \text{mit} \quad \vec{E} = \frac{\vec{J}}{\sigma} \quad (6-6)$$

mit

- \vec{A} : gerichtete Fläche des stromtragenden Querschnitts
- \vec{J} : Stromdichte
- σ : elektrische Leitfähigkeit
- \vec{E} : elektrische Feldstärke

Das elektrische Feld kann durch den Gradienten des elektrischen Potentials U beschrieben werden. Es gilt:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}U \quad (6-7)$$

mit

- $\vec{\nabla}U$: Gradient des elektrischen Potentials

Mit diesem Zusammenhang lässt sich die Potenzialverteilung berechnen. Durch das Integral des elektrischen Feldes entlang der Feldlinien zwischen zwei Punkten kann mit Gleichung (6-8) die elektrische Spannung, also die Potentialdifferenz, ausgegeben werden:

$$U = \int_s \vec{E} d\vec{s} \quad (6-8)$$

mit

- s : Pfad der elektrischen Feldlinien

Diese physikalischen Zusammenhänge sind in der FEM-Software *Comsol Multi-*

physics durch die Kontinuitätsgleichung der Ladungserhaltung² in der Differentialform implementiert. Für den stationären Fall gilt:

$$\operatorname{div} \vec{J} = \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \vec{\nabla} \cdot (-\sigma \cdot \vec{\nabla} U) = 0 \quad (6-9)$$

Als weitere Randbedingung wird einzelnen Bereichen die Information zugeordnet, ob ein elektrischer Strom fließen darf oder nicht. Die Kontaktfläche zwischen zwei Leitern wird als elektrisch isolierend ausgelegt. Lediglich im Bereich der Schweißpunkte wird ein Stromfluss zugelassen. Diese Annahme kann getroffen werden, da neben den Schweißpunkten bei realen Leitern aufgrund von Fremdschichten (Oxidschichten etc.) und mangelnder Kontaktkraft kein bzw. nur ein zu vernachlässigender Stromfluss stattfindet (siehe auch Abschnitt 2.4.3 auf S. 29).

Vernetzung

Die Kontaktgeometrie wird mit Pentaeder- und Tetraederelementen automatisiert vernetzt. Das Tetraedernetz wird im Bereich der Überlappverbindung des Kontaktes eingesetzt. Dabei wird ein Netz mit lokaler Netzverfeinerung im Bereich der Schweißpunkte generiert. Die übrigen Bereiche werden mit einem gröberen Netz aus Pentaederelementen aufgebaut (siehe **Abbildung 6-8**). Die Lösungsrechnung erfolgt in festen Zeitschritten von $\Delta t = 0,5$ s.

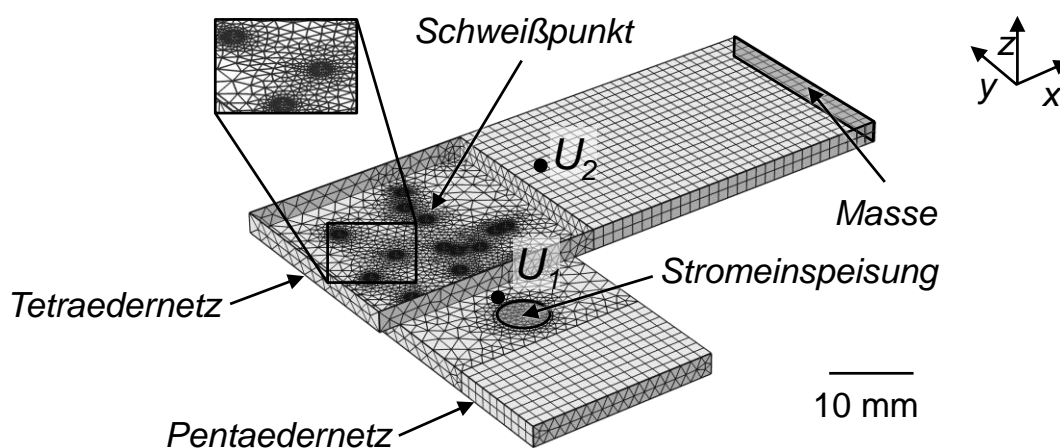


Abbildung 6-8: Vernetzung einer Leitergeometrie mit 113082 Elementen und mit $n_i = 15$ Schweißpunkten; Vernetzungsparameter:
 $l_{m,Pentaeder} = 0,08$ mm; $l_{m,Tetraeder} = 0,01$ mm

²Kontinuitätsgleichung der Ladungserhaltung (HENKE 2011, S. 50): $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$

Eine Ergebnisdarstellung der berechneten Stromdichteverteilung und des elektrischen Potentials werden für eine zufällige Schweißpunktverteilung in **Abbildung 6-9** dargestellt.

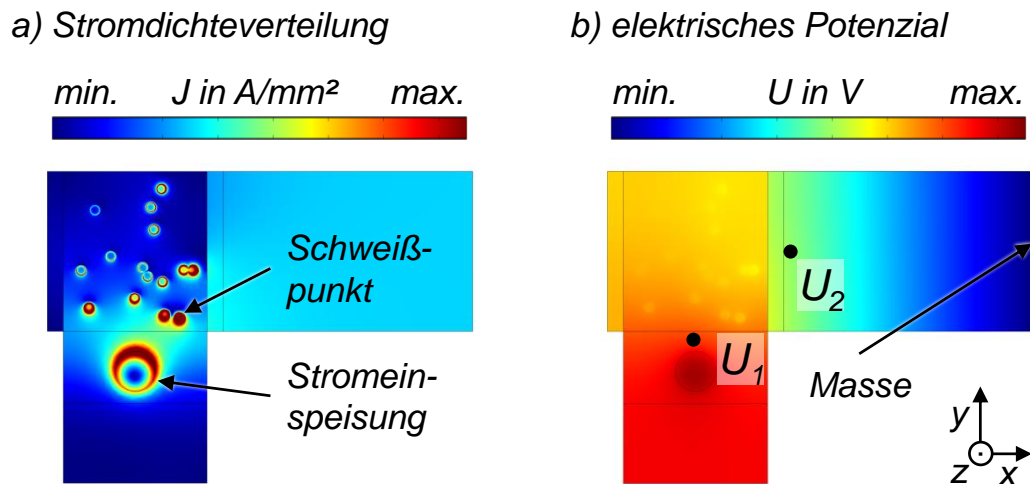


Abbildung 6-9: a) Stromdichteverteilung und b) elektrisches Potenzial der in Abbildung 6-8 gezeigten Leitergeometrie mit einer zufälligen Schweißpunktverteilung

6.3.3 Verifikation

Die Verifikation der thermoelektrischen Optimierung erfordert sowohl die Überprüfung der Optimierungsmethode als auch des Simulationsmodells. Dazu wurde die in Kapitel 4 beschriebene Scherzugprobe (vgl. **Abbildung 4-1** auf S. 54) als Leitergeometrie ausgewählt. Bei diesem Kontakt ist zum einen das Optimum bereits bekannt (siehe Abschnitt 5.2.2 auf S. 71) und zum anderen konnte im Rahmen dieser Arbeit die Kontaktgütemaßzahl der laserstrahlgeschweißten Proben mit Hilfe des Prüfstands zur Widerstandsmessung (vgl. Abschnitt 4.3.3) bestimmt werden. Für die Verifikationsversuche wurde der Aluminiumwerkstoff EN AW-1050A, ein Prüfstrom von $I_0 = 180$ A und eine Prüfdauer von $t_{Prüf} = 2$ s verwendet (siehe **Tabelle 4-3** auf S. 59). Die Umgebungsbedingung des Simulationsmodells wurde mit $T_{Ref} = 22$ °C angenommen. Als Zielfunktion wurde gemäß Gleichung (6-5) die Potentialdifferenz zwischen den Messpunkten U_1 und U_2 über der Messstrecke l_x bestimmt. Die elektrische Kontaktierung wurde in diesem Fall mit 24 Schweißpunkten mit jeweils 1 mm^2 Anbindungsfläche ($r_{Punkt} = 0,564$ mm) ausgeführt. Der Prüfstrom wurde flächig am Rand der Probe eingespeist und ebenfalls flächig durch die Masse-Bedingung ausgeleitet (siehe **Abbildung 6-10 a**)).

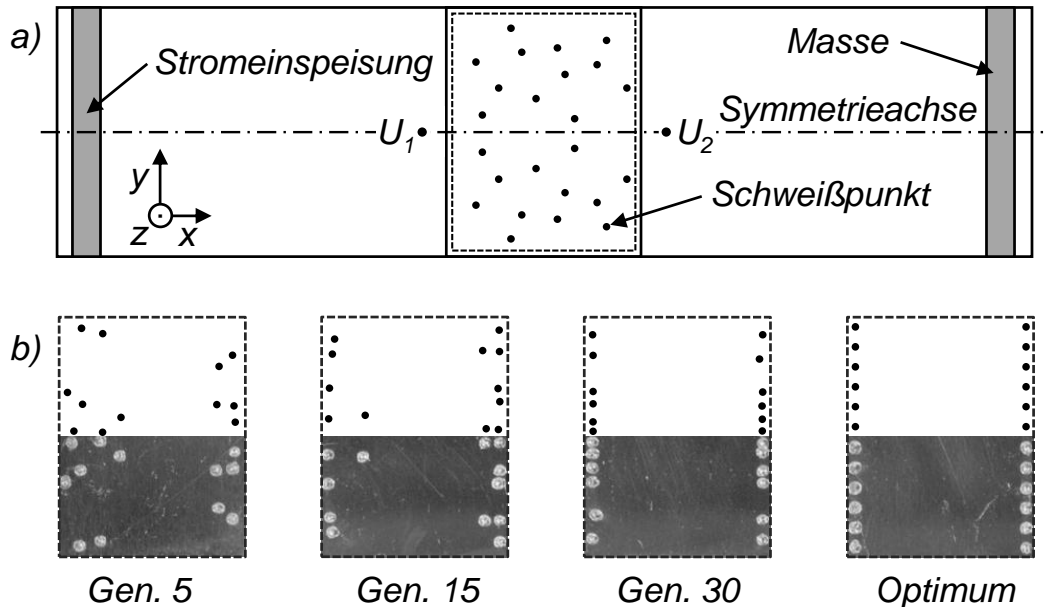


Abbildung 6-10: a) Aufbau und Randbedingungen für die elektrische Optimierung der Scherzugprobe nach DIN EN ISO 14273 mit zufälliger Schweißpunktverteilung; b) Entwicklung der besten berechneten Individuen sowie das Optimum der Schweißpunktverteilung für den Werkstoff EN AW-1050A, Schweißparameter:

$$P_L = 1,65 \text{ kW}, v_L = 6 \text{ m/min}, r_{\text{Punkt}} = 0,4 \text{ mm}$$

Bei dieser Probengeometrie liegt eine Symmetrie zur x-z-Ebene vor. Deshalb wurden 12 der 24 Schweißpunkte innerhalb des halben Definitionsbereichs variiert und bei der Modellierung an der Symmetrieachse entsprechend gespiegelt. Dies verringert die Anzahl der Optimierungsvariablen von 48 auf 24.

Um eine effiziente Konvergenz der Zielfunktion zu erhalten, hat es sich als günstig erwiesen, dass die Populationsgröße in der gleichen Größenordnung wie die Anzahl der Optimierungsvariablen liegen sollte. Deshalb wurde für die Parametrierung des GA eine Populationsgröße $n_p = 30$ sowie eine Turniergröße $n_t = 4$ definiert. Für die Reproduktion werden 2 Individuen für den Elitismus, 44 Individuen für die Rekombination sowie 6 Individuen für die Mutation ausgewählt. Damit ergeben sich die Anteile der genetischen Operatoren zu $P_E = 0,067$, $P_R = 0,733$ und $P_M = 0,2$ (vgl. Gleichungen (6-2) und (6-3)). Mit dieser Aufteilung wird der größte Teil neuer Individuen über die Rekombination erzeugt. Dies hat den Vorteil, dass effizient neue verbesserte Lösungen erzielt werden können. Der geringe Anteil der Mutation führt im Wesentlichen bei einer bereits fortgeschrittenen Optimierung zu konsequenter Konvergenz. In **Abbildung 6-11** ist die Konvergenz des Zielfunktionswerts $Z_{el,j}$ für die elektrische Optimierung der Scherzugprobe dokumentiert.

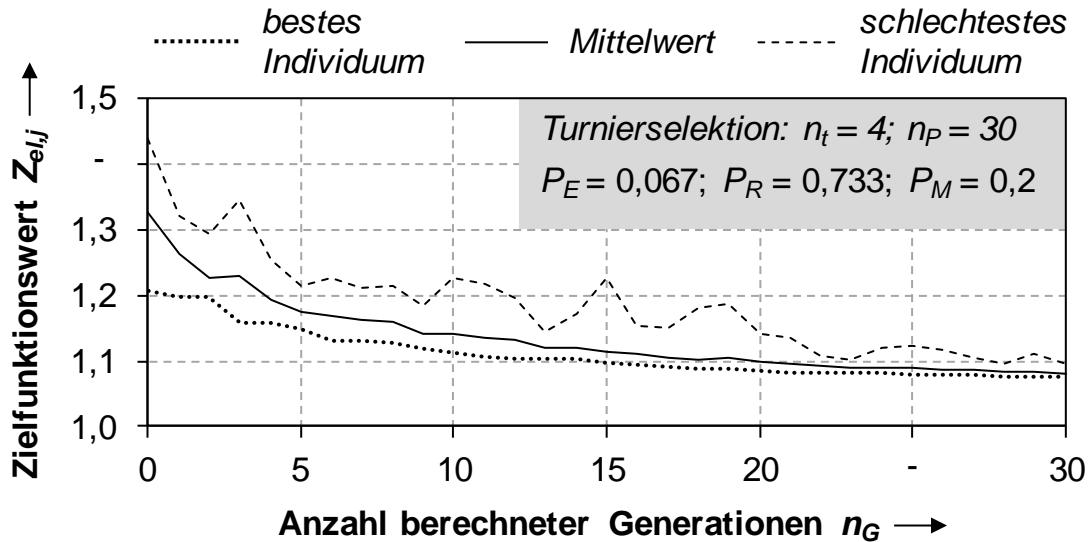


Abbildung 6-11: Konvergenzverhalten der Zielfunktion bei der elektrischen Optimierung der Scherzugprobengeometrie aus EN AW-1050A; dargestellt mit Hilfe der Anzahl berechneter Generationen n_G

Bereits nach 30 berechneten Generationen wurde eine Schweißpunktverteilung erreicht, welche nahezu dem Optimum ($Z_{el,j,30} = 1,076$, $Z_{el,j,Optimum} = 1,072$) entspricht. Das Optimum weist gegenüber der idealen Kontaktierung (vollflächige Anbindung innerhalb des Definitionsbereichs) nur eine um den Wert 0,072 (7,2%) schlechtere elektrische Leitfähigkeit auf, obwohl die Anbindungsfläche deutlich kleiner ist ($A_{Punkte} = 24 \times 1 \text{ mm}^2$, $A_{ideal} = 33 \times 43 \text{ mm}^2$). Damit kann die Funktionsweise des GA in Kombination mit der thermoelektrischen Modellbildung als nachgewiesen betrachtet werden.

Als nächster Schritt wurde die Güte des Simulationsmodells untersucht. Dazu wurden die besten Individuen der Generationen 5, 15, 30 sowie des Optimums ausgewählt und geschweißt, sodass die Kontaktgütemaßzahl experimentell bestimmt werden konnte. Um Schweißpunkte mit einer Anbindungsfläche von $1,0 \text{ mm}^2$ herzustellen, wurden in Vorversuchen geeignete Schweißparameter ermittelt. Der Radius der Schweißpunkte r_{Punkt} wurde variiert, wobei die Laserleistung ($P_L = 1,65 \text{ kW}$) und die Vorschubgeschwindigkeit ($v_L = 6 \text{ m/min}$) unverändert blieben. Als Radius wurde $r_{Punkt} = 0,4 \text{ mm}$ festgelegt. Mit diesem Parametersatz wurden Schweißpunkte mit einer gemessenen Anbindungsfläche in der Fügeebene zwischen $0,9$ und $1,1 \text{ mm}^2$ erzielt. **Abbildung 6-10 b)** veranschaulicht die gefügten Schweißpunktverteilungen.

Ein Vergleich der Kontaktgütemaßzahl der simulierten und der geschweißten Proben zeigt, dass die Simulation die Kontaktgütemaßzahl in guter Näherung

berechnet, siehe **Abbildung 6-12**. Die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment liegen im Bereich von 0 bis 2,6%. Als Ursache für diese Abweichungen kann die Streuung der Anbindungsflächen der geschweißten Proben genannt werden. Diese Verifikation bestätigt somit die Gültigkeit des eingesetzten thermoelektrischen Simulationsmodells.

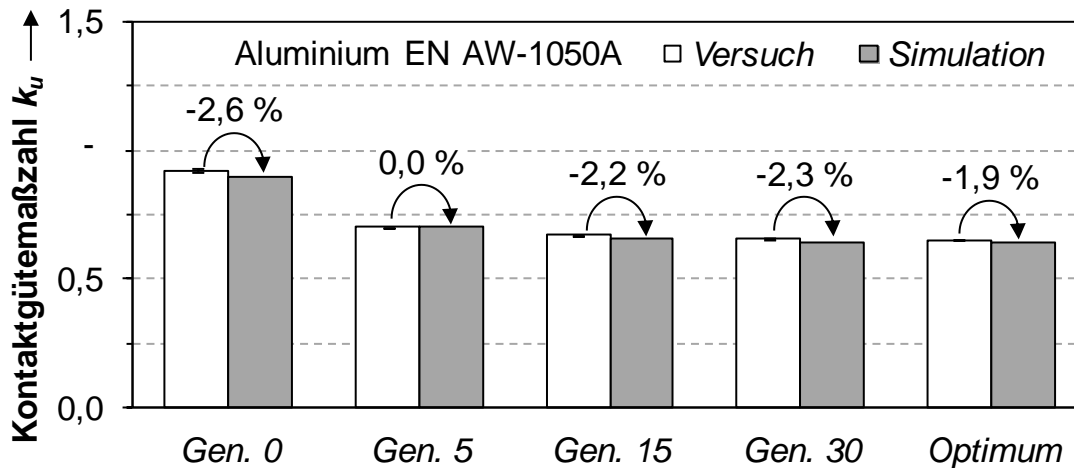


Abbildung 6-12: Vergleich der in der Simulation berechneten und gemessenen Kontaktgütemaßzahl der Schweißpunktverteilungen 0 bis 30 sowie des Optimums für den Werkstoff EN AW-1050A (Scherzugprobe nach DIN EN ISO 14273); Schweißparameter: $P_L = 1,65 \text{ kW}$, $v_L = 6 \text{ m/min}$, $r_{\text{Punkt}} = 0,4 \text{ mm}$; $s_M = 15$ (Systemtechnik gemäß Abschnitt 4.2)

6.4 Optimierung der mechanischen Eigenschaften

6.4.1 Definition der Zielfunktion

Zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften einer Schweißpunktverteilung werden die elastomechanischen Spannungen unter der Einwirkung einer statischen Kraft herangezogen (siehe **Abbildung 6-1 b**). Um die Beanspruchung der Verbindung zu minimieren, gilt es die auftretenden Spannungen an den Schweißpunkten zu minimieren bzw. gleichmäßig auf alle Schweißpunkte aufzuteilen. Je nach Lastfall treten Zug- bzw. Druckspannungen (σ_{zd}), Biegespannungen (σ_b) sowie Schubspannungen (τ_t) auf. Mit Hilfe der Vergleichsspannung nach der *Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH)* können diese Größen zusammengefasst werden (NIEMANN ET AL. 2005, S. 84). Es gilt:

$$\sigma_{v,GEH} = \sqrt{(\sigma_{zd} + \sigma_b)^2 + 3\tau_t^2} \quad (6-10)$$

mit

- $\sigma_{v,GEH}$: Vergleichsspannung nach der GEH
- σ_{zd} : Zug- bzw. Druckspannung (Normalspannung)
- σ_b : Biegespannung
- τ_t : Schubspannung

Dies ist nach NIEMANN ET AL. (2005, S. 85) zulässig, da es sich bei den hier verwendeten um duktile Werkstoffe handelt und das Versagen der Verbindung bei hoher plastischer Verformung zu erwarten ist. Die Zielfunktion wird nun wie folgt formuliert:

$$Z_{m,j} = \max(\sigma_{v,GEH,i,j}) = \sigma_{max,j} \quad (6-11)$$

mit

- $Z_{m,j}$: Zielfunktion der mechanischen Optimierung des Individuums j
- $\sigma_{v,GEH,i,j}$: Vergleichsspannung eines Schweißpunktes i des Individuums j
- $\sigma_{max,j}$: maximale Vergleichsspannung eines Individuums j

Die Zielfunktion nach Gleichung (6-11) ermittelt die maximalen Vergleichsspannungen der einzelnen Schweißpunkte i eines Individuums j . Der GA hat nun die Aufgabe, den Zielfunktionswert $Z_{m,j}$ bzw. $\sigma_{max,j}$ zu minimieren. Die Berechnung des Zielfunktionswerts wird anhand elastomechanischer Simulationsmodelle durchgeführt, welche in dem folgenden Abschnitt 6.4.2 detailliert erläutert werden. Der GA übergibt analog zur elektrischen Optimierung die x- und y-Koordinaten der einzelnen Individuen über eine Schnittstelle von Matlab an die FEM-Software Comsol. Im Anschluss wird jede Schweißpunktverteilung einer Population nacheinander simuliert und der jeweilige Wert der maximalen Vergleichsspannung eines Individuums j $\sigma_{max,j}$ an den GA übermittelt. Entsprechend dem Ablauf der elektrischen Optimierung werden die initialisierten bzw. neu generierten Schweißpunktverteilungen mit Hilfe der genannten Kontrollfunktion (vgl. Abschnitt 6.2.3) überprüft, um ungültige und identische Schweißpunktverteilungen zu identifizieren, zu korrigieren oder auszusortieren.

6.4.2 Elastomechanische Modellbildung

Zur Modellierung der elastomechanischen Eigenschaften wurde im Rahmen dieser Arbeit die Software *Comsol Multiphysics 4.3b* unter Verwendung des Moduls *Structural Mechanics* eingesetzt. Die Schnittstelle zwischen Matlab und Comsol wird dabei durch das Modul *LiveLink for Matlab* realisiert.

Definition der Randbedingungen

Bei der elastomechanischen Modellierung wird als erster Schritt die Leitergeometrie aufgebaut. Jedem Bauteil wird anschließend ein Werkstoff zugeordnet. Zur Lösung der Grundgleichungen der Elastostatik werden als weitere Größen lediglich der Elastizitätsmodul E und die Querkontraktionszahl ν benötigt (vgl. **Tabelle 4-2** auf S. 56). Basierend auf dem Hook'schen Gesetz können nun mit Hilfe einer anliegenden Last die Verzerrungen bzw. die auftretenden Spannungen ermittelt werden. Für eine umfassende Beschreibung der Berechnungsabläufe der elastomechanischen FEM-Simulation wird auf folgende einschlägige Literatur verwiesen (KLEIN 2012, S. 19 ff.). Die Schweißpunkte dienen als flächige und vollständige Verbindung zwischen den Leitern, sodass Kräfte übertragen werden können. Als weitere Randbedingungen müssen die Position, die Richtung und der Betrag der Krafteinleitung sowie die Einspannung festgelegt werden.

Vernetzung und Spannungsberechnung

Die Kontaktgeometrie wird vollständig mit Tetraederelementen vernetzt. Im Bereich der Schweißpunkte wird das Netz lokal sehr fein skaliert $l_{m,Tetraeder} = 0,008$ mm, um die Genauigkeit der Spannungsberechnung zu steigern. Eine vernetzte Leitergeometrie wird in **Abbildung 6-13** gezeigt.

Im Gegensatz zur thermoelektrischen FEM-Simulation, die iterativ abläuft, erfolgt die mechanische Lösungsberechnung in nur einem Schritt. Dies ist möglich, da die Vergleichsspannungen für einen statischen Lastfall berechnet werden und kein plastisches Materialverhalten berücksichtigt wird.

Die Spannungsverteilung der Schweißpunkte wird mit Hilfe der Knotenspannungen $\sigma_{k,i,j}$ innerhalb eines Suchbereichs ermittelt. Hohe Spannungen treten vor allem an den Rändern des Schweißpunktes auf. Daher wird der Radius des

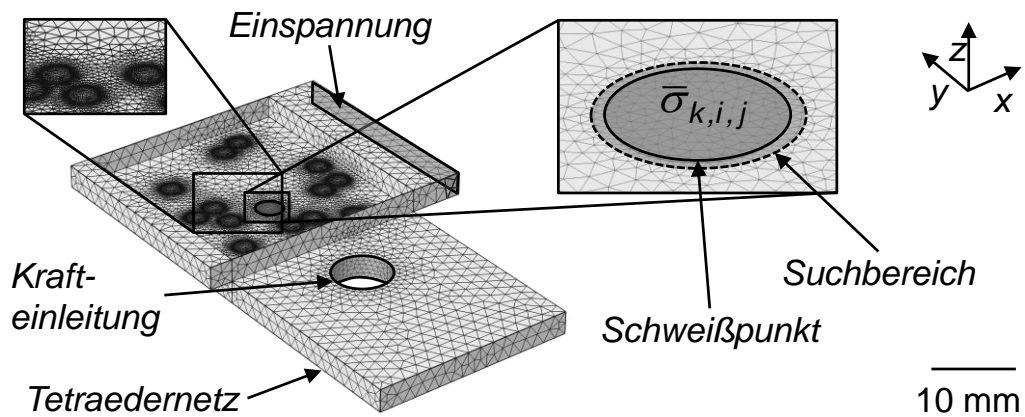


Abbildung 6-13: Vernetzung einer Leitergeometrie mit 257063 Elementen und mit $n_i = 15$ Schweißpunkten; Vernetzungsparameter:
 $l_{m,Tetraeder} = 0,008 \text{ mm}$

Suchbereichs r_s um 0,1 mm größer als der Radius des Schweißpunktes gewählt ($r_s = r_{Punkt} + 0,1 \text{ mm}$). Innerhalb dieses Suchbereichs wird der arithmetische Mittelwert aller Knotenspannungen $\bar{\sigma}_{k,i,j}$ gebildet:

$$\bar{\sigma}_{k,i,j} = \frac{\sum_1^{n_k} \sigma_{k,i,j}}{n_k} \quad (6-12)$$

mit

- $\bar{\sigma}_{k,i,j}$: mittlere Knotenspannung des Schweißpunktes i eines Individuums j
- $\sigma_{k,i,j}$: Spannung eines Knotens k des Schweißpunktes i eines Individuums j
- n_k : Anzahl der Knoten innerhalb des Suchbereichs

Mit der Betrachtung der mittleren Knotenspannungen kann verhindert werden, dass einzelne Spannungsspitzen, die aufgrund von Vernetzungsfehlern auftreten, die Lösungsberechnung zu stark beeinflussen. Dadurch ist ein robuster Vergleich der berechneten Spannungen unterschiedlicher Individuen möglich. Die maximale mittlere Vergleichsspannung der Schweißpunkte i eines Individuums j kann nun mit Gleichung (6-13) berechnet werden:

$$\sigma_{max,j} = \max(\bar{\sigma}_{k,i,j}) \quad (6-13)$$

6.4.3 Verifikation

Die Verifikation der elastomechanischen Optimierung wurde an einem einfachen mechanischen Ersatzsystem, bei welchem die optimale Schweißpunktverteilung bereits bekannt ist, durchgeführt. Dazu wurde ein Torsionsstab ausgewählt, der aus zwei übereinanderliegenden Zylindern besteht, welche durch mehrere Schweißpunkte in der Mittelebene verbunden sind, siehe **Abbildung 6-14 a)**. In diesem Fall entspricht der Definitionsbereich zur Positionierung der Schweißpunkte der Kreisfläche des Zylinders. Der untere Zylinder wird fest eingespannt, der obere Zylinder wird mit einem Drehmoment um die z -Achse beaufschlagt. Für dieses mechanische Ersatzsystem ist die Spannungsverteilung bekannt. Es ist offensichtlich, dass die auftretenden Schubspannungen in der Ebene zwischen den beiden Zylindern mit zunehmendem Abstand von der Mittelachse ansteigen. Eine optimale Verteilung der Schweißpunkte liegt also dann vor, wenn die Schweißpunkte mit einem möglichst großen Abstand von der Mittelachse gleichmäßig auf dem Umfang der Kreisfläche des Zylinders verteilt werden. Dieser Lastfall wurde zur qualitativen Verifikation der Optimierungsmethode nachgebildet und berechnet.

Die mechanische Verbindung der Zylinder aus dem Werkstoff EN AW-1050A mit einem Durchmesser von 20 mm wurde mit 12 Schweißpunkten ($r_{Punkt} = 0,9$ mm) modelliert. Es wurde ein Drehmoment von nur $M_z = 4$ Nm gewählt, um sicherzustellen, dass rein elastische Spannungen auftreten. Das Optimum weist bei diesem Lastzustand einen Zielfunktionswert von $\sigma_{max,Optimum} = 20,4$ N/mm² auf. Der GA wurde mit den folgenden Werten parametrisiert:

- Turniersélection: $n_t = 4$
- Populationsgröße: $n_p = 50$
- Anteile der genetischen Operatoren: $P_E = 0,04$, $P_R = 0,68$ und $P_M = 0,28$ nach Gleichung (6-2) und (6-3)
- Abbruchkriterium: $z_G = 5$; $Z_{j,k,min} = 1$ N/mm²

Der GA wurde nach 80 Generationen automatisch gemäß dem Abbruchkriterium gestoppt. Das beste Individuum dieser Generation weist eine Schweißpunktverteilung mit einem Zielfunktionswert $\sigma_{max,j} = 22,6$ N/mm² auf. Dies entspricht einer Abweichung gegenüber dem aus Vorüberlegungen abgeleiteten Optimum von 11% bezogen auf den Zielfunktionswert. In **Abbildung 6-14 b)** werden die berechneten Schweißpunktverteilungen der Generation 0 und 80 sowie das Optimum veranschaulicht. Als Ergebnisdarstellung wird die berechnete Vergleichs-

spannung σ_{GEH} in der x-y-Ebene zwischen Zylinder 1 und 2 ebenfalls angegeben (siehe **Abbildung 6-14 c)**).

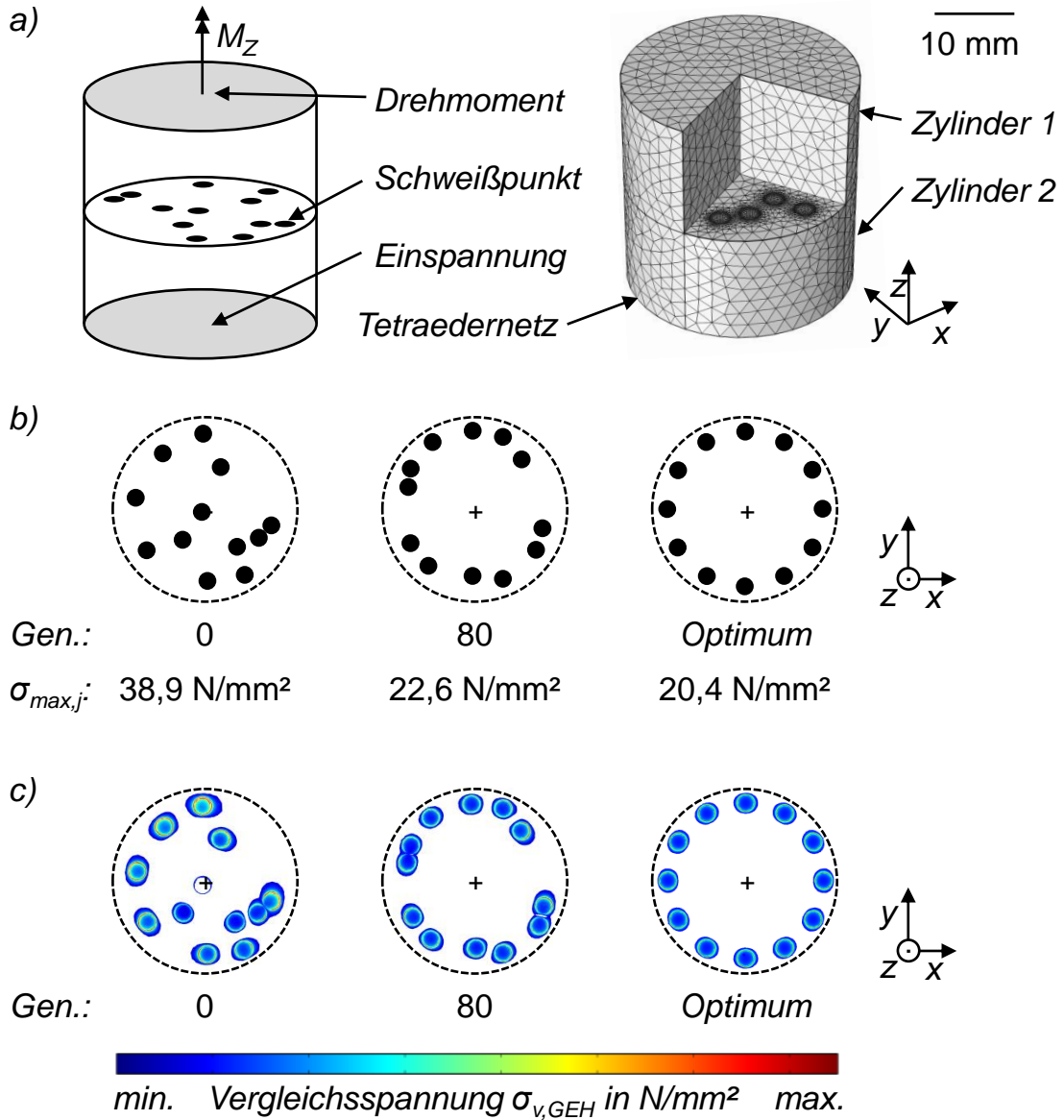


Abbildung 6-14: a) Prinzipdarstellung eines Torsionsstabs und des vernetzten Simulationsmodells (Vernetzungsparameter: $l_{m,Tetraeder} = 0,008 \text{ mm}$) zur Verifikation der elastomechanischen Optimierung; b) Schweißpunktverteilung und maximale mittlere Knotenspannung $\sigma_{max,j}$ der Generationen 0 und 80 sowie des Optimums für den Werkstoff EN AW-1050A; c) berechnete Vergleichsspannungen $\sigma_{v,GEH}$ für die vorliegenden Schweißpunktverteilungen in der x-y-Ebene zwischen Zylinder 1 und 2

Dieses Optimierungsergebnis verdeutlicht, dass die maximale mittlere Knotenspannung $\sigma_{max,j}$, welche mit Hilfe der Vergleichsspannung nach der GEH ermittelt wird, als Kriterium zur mechanischen Optimierung der Schweißpunktverteilung geeignet ist. Die Verifikation bezieht sich lediglich auf die Optimierungsmethode. Der absolute Betrag der numerisch berechneten Spannungen wurde durch Plausibilitätsüberlegungen validiert, jedoch nicht experimentell nachgewiesen.

6.5 Multikriterielle Optimierung

6.5.1 Definition der Zielfunktion

Bei der multikriteriellen Optimierung einer Kontaktgeometrie werden sowohl die elektrischen als auch die mechanischen Eigenschaften berücksichtigt. Die elektrischen Eigenschaften werden durch den Zielfunktionswert der elektrischen Optimierung $Z_{el,j}$ abgebildet, vgl. Gleichung (6-5). Die mechanischen Eigenschaften werden durch eine weitere Zielfunktion $Z_{T,j}$ integriert, die eine zulässige Grenzspannung σ_{zul} mit in die Bewertung einer Schweißpunktverteilung einbezieht. Die Zielfunktion der multikriteriellen Optimierung $Z_{el,m,j}$ setzt sich somit aus zwei Teilfunktionen zusammen:

$$Z_{el,m,j} = Z_{el,j} + Z_{T,j} \quad (6-14)$$

mit

$Z_{el,m,j}$: Zielfunktion der multikriteriellen Optimierung eines Individuums j

$Z_{T,j}$: Zielfunktion zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften bei der multikriteriellen Optimierung eines Individuums j

Die Teilkomponente $Z_{T,j}$, ein sogenannter Straf-Term, hat die Aufgabe, jene Individuen, welche die Bedingung $\sigma_{max,j} < \sigma_{zul}$ nicht einhalten, künstlich zu verschlechtern, sodass diese sich bei der Selektion nicht durchsetzen können. Dieses Vorgehen wird von KRUSE ET AL. (2011, S. 181) vorgeschlagen, wenn mehrere Randbedingungen bei der Optimierung berücksichtigt werden. Es gilt:

$$Z_{T,j} = \begin{cases} 0 & \text{falls } \sigma_{max,j} < \sigma_{zul} \\ \left[\left(\frac{\sigma_{max,j}}{\sigma_{zul}} \right)^2 - \xi \right] & \text{falls } \sigma_{max,j} \geq \sigma_{zul} \end{cases} \quad (6-15)$$

mit

σ_{zul} : Grenzspannung

ξ : Straf-Term-Parameter

Falls die Bedingung $\sigma_{max,j} < \sigma_{zul}$ erfüllt wird, erfolgt eine rein elektrische Optimierung, da in diesem Fall $Z_{T,j}$ den Wert 0 annimmt. Ist dies nicht der Fall, wird der Zielfunktionswert durch einen sogenannten Straf-Term erhöht. Im Falle $\sigma_{max,j} = \sigma_{zul}$ wird $Z_{el,m,j}$ um den Wert $1-\xi$ erhöht. Für höhere Spannungswerte nimmt $Z_{T,j}$ quadratisch zu. Der Straf-Term-Parameter ξ muss spezifisch an das Optimierungsproblem angepasst werden. Liegt $\sigma_{max,j} = \sigma_{zul}$ vor, hat das Individuum bereits eine hohe Lösungsgüte. Daher darf die Erhöhung des Zielfunktionswerts nur sehr gering ausfallen, um die Informationen dieses Individuums mit in die nächste Generation überführen zu können.

Die multikriterielle Optimierung verläuft analog zur elektrischen und zur mechanischen Optimierung. Wie bereits in Abschnitt 6.2.2 beschrieben, werden die einzelnen Schweißpunktverteilungen sequenziell thermoelektrisch und elasto-mechanisch modelliert und berechnet. Zunächst wird die Zielfunktion $Z_{el,j}$ gelöst. Anschließend wird $\sigma_{max,j}$ bestimmt und in $Z_{T,j}$ eingesetzt. Als letzter Schritt wird $Z_{el,m,j}$ ermittelt, sodass der Rang des Individuums innerhalb der entsprechenden Population für die folgende Selektion und Reproduktion festgelegt werden kann.

6.6 Zusammenfassung

In den vorherigen Abschnitten wurde die simulationsgestützte Methode zur Optimierung elektrischer Kontakte vorgestellt. Diese Methode ermöglicht eine Berechnung der am besten geeigneten Schweißpunktverteilung für Kontakte, die in einer Überlappkonfiguration angeordnet sind. Dabei können elektrische und mechanische Lastfälle wie auch eine Kombination dieser Lastfälle berücksichtigt werden. Die Verifikation der Optimierungsmethode erfolgte anhand bereits bekannter Problemstellungen, sodass eine Bewertung der berechneten und der optimalen Schweißpunktverteilung durchgeführt werden konnte. Damit stehen nun Modelle zur Verfügung, die es erlauben, weitere anwendungsnahe elektrische und mechanische Lastfälle zu berechnen.

Die Optimierungsmethode kann unabhängig vom verwendeten Werkstoff, den Werkstoffkombinationen oder auch dem Fügeverfahren eingesetzt werden. Es muss lediglich sichergestellt sein, dass die elektrische Leitfähigkeit der Fügeflächen gleich der des Grundwerkstoffs ist oder einen bereits bekannten Wert aufweist. Die geometrische Verteilung der Anbindungsfläche kann durch weitere Fügeverfahren wie beispielsweise das Widerstandspunktschweißen, das elektrisch leitfähige Kleben oder Löten realisiert werden, solange die Randbedingungen der thermischen Belastung der Kontaktstellen eingehalten werden. Dies erweitert die Einsatzmöglichkeit der Optimierungsmethode.

Diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Optimierungsmethode wird abschließend in Kapitel 7 am Beispiel der Anwendung für elektrische Kontakte eines Batteriemoduls beschrieben.

7 Elektrische Kontaktierung eines Batteriemoduls

7.1 Allgemeines

Um die Methode zur simulationsgestützten Auslegung elektrischer Kontakte an einem Demonstrator zu verifizieren, wurde ein Batteriemodul mit acht Lithium-Ionen-Zellen konstruiert und aufgebaut. In den folgenden Abschnitten werden zunächst der Aufbau und die daraus abgeleitete Geometrie der Zellpole und Zellverbinder vorgestellt. Anschließend wird eine Lösung dafür präsentiert, wie eine Kupfer-Anode mit einem Aluminium-Zellpol stoffschlüssig verbunden werden kann. Damit beschränkt sich die weitere Kontaktierung der Zellen untereinander auf artgleiches Laserstrahlschweißen von Aluminium. Für diese Verbindung wurde das Schweißnahtmuster simulationsgestützt optimiert, nachdem als Eingangsgröße die maximale Anbindungsfläche zur Kontaktierung ermittelt wurde. Im Anschluss wurde das Batteriemodul mit dem elektrisch optimierten Schweißnahtmuster gefügt und hinsichtlich technologischer sowie wirtschaftlicher Aspekte mit dem Referenzverfahren Schrauben verglichen. Dies alles wird in den weiteren Abschnitten beschrieben.

7.2 Modulaufbau

Das Batteriemodul enthält acht prismatische Lithium-Ionen-Zellen vom Typ UF261591 der Fa. Panasonic. Diese Zelle hat eine Nennspannung von 3,7 V und eine Kapazität von 25 Ah. Eine Seitenplatte, eine Seitenwand sowie eine Kühlplatte bilden die Struktur des Moduls. Die Zellen werden durch Kunststoffelemente elektrisch isoliert. Ein weiteres Kunststoffbauteil dient zur Aufnahme und zur Positionierung der Zellverbinder. Über zwei verschraubte Steckverbindungen wird die HV-Verbindung sichergestellt. Mit Hilfe dieser Stecker können mehrere Module seriell verbunden werden. Die **Abbildung 7-1** zeigt die Komponenten des Batteriemoduls.

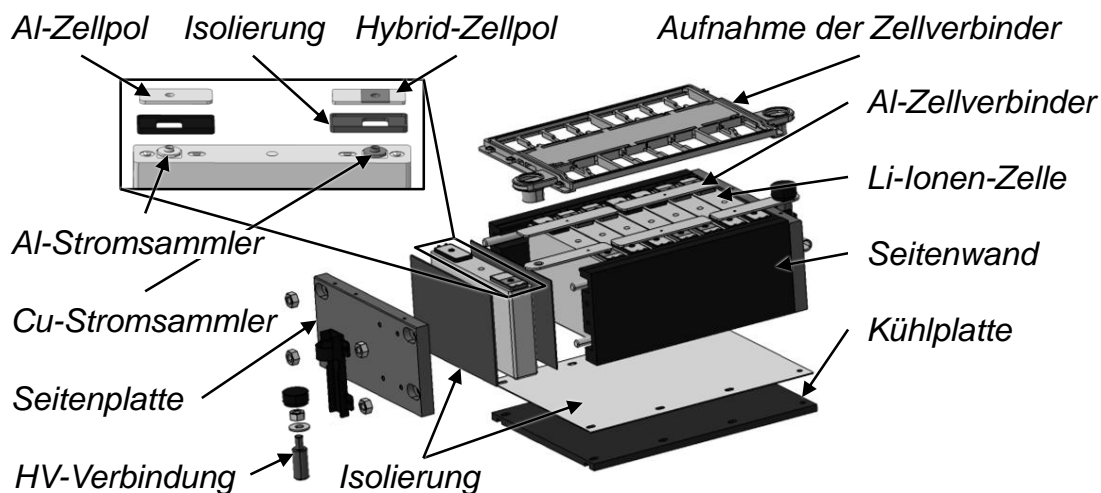


Abbildung 7-1: Batteriemodul mit acht prismatischen Lithium-Ionen-Zellen

Die in der Lithium-Ionen-Zelle integrierten Stromsammler aus den Werkstoffen Aluminium (Kathode) bzw. Kupfer (Anode) werden über Zellpole mit Aluminium-Zellverbindern kontaktiert. Diese Kontaktgeometrie gilt für das gesamte Batteriemodul. Aufgrund dieses Modulaufbaus ergeben sich folgende Fügeaufgaben:

- Kathode: Aluminium-Stromsammler – Aluminium-Zellpol
- Anode: Kupfer-Stromsammler – Aluminium-Kupfer-Hybrid-Zellpol
- Aluminium-Zellpol – Aluminium-Zellverbinder

Auf der Kathodenseite wurde die Verbindung von Stromsammler und Zellpol für dieses Anwendungsbeispiel mit einer gepulsten Laserstrahlquelle und den folgenden Parametern verschweißt: Pulsleistung $P_{L,Puls} = 3,9 \text{ kW}$ und Pulszeit $t_{Puls} = 4,0 \text{ ms}$. Die Kenngrößen des gepulsten Lasersystems finden sich in Anhang A2.

Auf der Anodenseite wurde ein Hybridelement verwendet, um die in den Abschnitten 0 und 3.3 beschriebene Problematik einer Aluminium-Kupfer-Mischverbindung zu umgehen und ein artgleiches Laserstrahlschweißen zu ermöglichen (vgl. **Abbildung 2-5 b**) auf S. 12). Die Umsetzung wird in Abschnitt 7.3 ausführlich erläutert.

Die elektrische Kontaktierung von Zellpol und Zellverbinder wird in Abschnitt 7.4 beschrieben. Diese Fügeaufgabe steht im Zentrum dieser Arbeit, da hierauf die in Kapitel 6 eingeführte Methode zur simulationsgestützten Auslegung elektrischer Kontakte angewendet wurde.

7.3 Fügen des Aluminium-Kupfer-Hybridelements

7.3.1 Auswahl geeigneter Fügeverfahren

Zur Herstellung des Aluminium-Kupfer-Hybridelements wurden Fügeverfahren gesucht, welche einen Stoffschluss ohne Aufschmelzen der Fügepartner ermöglichen. Die Verbindungsmechanismen beruhen bei diesen sogenannten Festphasenfügeverfahren vornehmlich auf Diffusionsprozessen. Dabei bilden sich zwar intermetallische Phasen aus, die nach RAYNE ET AL. (1980, S. 383) und BRAUNOVIC & ALEXANDROW (1994, S. 27) eine geringere elektrische Leitfähigkeit aufweisen, jedoch kann dieser Einfluss aufgrund der geringen Dicke der Phasensäume von weniger als 10 µm vernachlässigt werden (vgl. Abschnitt 2.3.6 auf S. 23).

Als Auswahlkriterien geeigneter Fügeverfahren wurden eine hohe elektrische Leitfähigkeit durch eine stoffschlüssige Verbindung und eine hohe Prozesssicherheit beim Fügen festgelegt. Zur Herstellung der Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen wurden daraufhin sechs geeignete Fügeverfahren identifiziert:

- Kaltgasspritzen (KGS)
- Dovetail-Walzplattieren (*deutsch: Schwalbenschwanz-Walzplattieren*)
- Elektromagnetische Pulstechnologie (EMPT)
- Ultraschallschweißen (USS)
- Leitkleben
- Walzplattieren

Auf eine Beschreibung aller Fügeverfahren wird aufgrund der meist großen industriellen Verbreitung und der guten Dokumentation in der Literatur an dieser Stelle verzichtet. Es werden lediglich die Verfahren *Kaltgasspritzen* und *Dovetail-Walzplattieren* vorgestellt (LANGE ET AL. 1993, HABENICHT 2009, WESTKAEMPER & WARNECKE 2010).

Das Kaltgasspritzen ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem metallische Partikel über einen Luftstrom beschleunigt werden und mit hoher Geschwindigkeit auf ein Substrat auftreffen. Dabei entsteht über Diffusionsmechanismen ein Stoffschluss. Zur Erzeugung einer *Dovetail-Verbindung* der Firma Materion Technical Materials Co., Ltd. (vgl. **Abbildung 7-2 c**) werden zunächst die Fügepartner mechanisch bearbeitet, sodass diese im Stumpfstoß keilförmig ineinander gesteckt werden können. Anschließend wird dieser Verbund auf das entsprechende Soll-Maß gewalzt und in einem Ofen wärmebehandelt. Die letzten Prozess-

schritte ähneln dem Walzplattieren, weshalb der Begriff Dovetail-Walzplattieren (engl.: Dovetail Clad) ebenfalls gebräuchlich ist.

Zur Bewertung der Verfahren wurden Proben³ gefertigt und hinsichtlich elektrischer und mechanischer Eigenschaften charakterisiert. Die Parameter zur Herstellung der Verbindungen können dem Anhang A1 entnommen werden. Eine Draufsicht der gefügten Proben sowie ein Querschliff sind in **Abbildung 7-2 a)** bis **g)** gezeigt. Um die Eigenschaften der Mischverbindungen vergleichen zu können, wurde eine einheitliche Probengeometrie nach DIN EN ISO 14273 (Scherzugprobe nach Abschnitt 4.2.1 auf S. 54) gewählt. Dennoch variieren die Geometrie und die Größe der Anbindungsfläche der Fügeverbindungen, welche die elektrischen und mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Beim Kaltgas-spritzen und dem Dovetail-Walzplattieren können ausschließlich ebene Proben gefügt werden. Daher weicht die Geometrie dieser Proben von der Scherzugprobengeometrie ab. Um Proben mit diesen Randbedingungen verfahrenübergreifend zu vergleichen, wurden die Kontaktgütemaßzahl und die maximale Zug- bzw. Scherzugkraft als Kriterien herangezogen. Dieses Vorgehen lässt zwar keinen direkten Vergleich der auf die jeweilige Anbindungsfläche bezogenen elektrischen Leitfähigkeit bzw. mechanischen Festigkeit der Mischverbindungen zu, dafür werden die verfahrensspezifischen Verbindungsmerkmale vollständig berücksichtigt. Auch eine laserstrahlgeschweißte Aluminium-Kupfer-Mischverbindung wird zur Verdeutlichung der Potenziale der Fügeverfahren in den Vergleich aufgenommen. Diese Probe wurde ohne die in Abschnitt 3.3.2 aufgeführten Strategien zur Vermeidung intermetallischer Phasen erzeugt (vgl. **Abbildung 7-2 a)**).

7.3.2 Ermittlung der Kontaktgütemaßzahl und der Verbindungsfestigkeit

Die Kontaktgütemaßzahlen der Mischverbindungen wurden mit Hilfe des Prüfstands zur Widerstandsmessung (siehe Abschnitt 4.3.3 auf S. 59) ermittelt. Zur Bewertung der Verbindungsfestigkeit wurden Zug- bzw. Scherzugversuche nach DIN EN ISO 6892-1 durchgeführt (Prüfbedingungen der Zugprüfmaschine nach ISO 7500-1). Die Ergebnisse der ermittelten Kontaktgütemaßzahlen und der Verbindungsfestigkeiten sind in **Abbildung 7-3** dokumentiert.

³ Proben der Verfahren EMPT, USS und Leitkleben wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts „Produktionsforschung zu Hochvolt-speichersystemen für die Elektromobilität (eProduction)“ von verschiedenen Projektpartnern hergestellt.

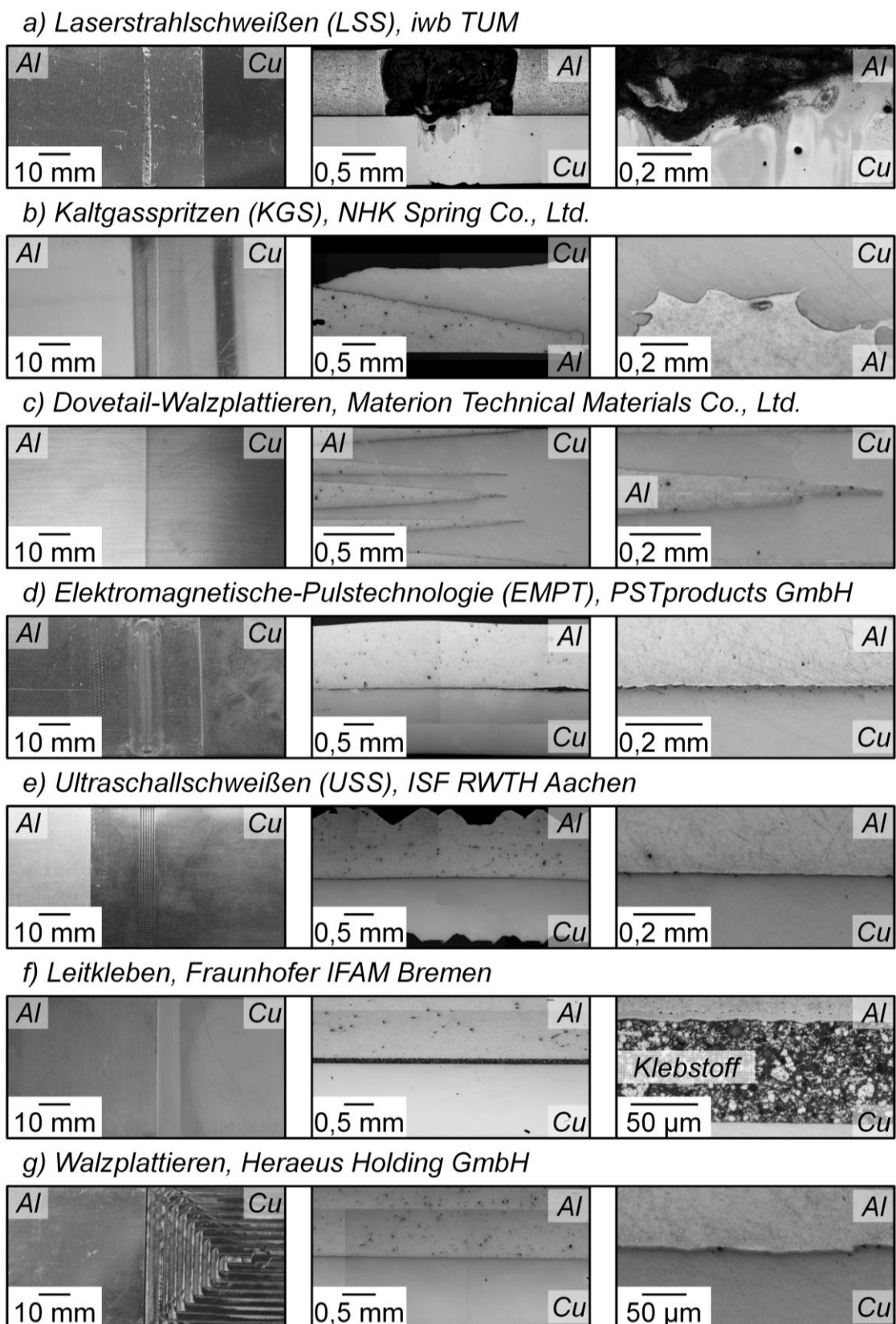


Abbildung 7-2: Draufsicht (links) und Querschliff (Mitte und rechts) der untersuchten Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen³ und Angabe des jeweiligen Herstellers

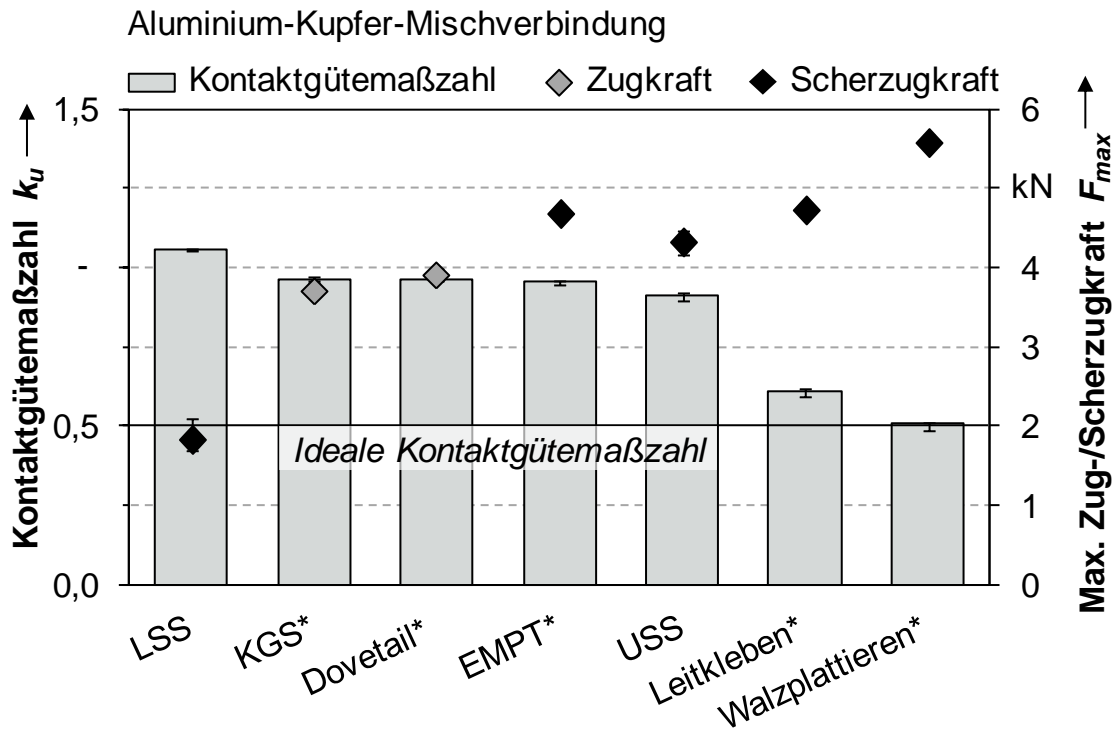


Abbildung 7-3: Vergleich der Kontaktgütemaßzahl ($s_M = 21$) und der maximalen Zug- bzw. Scherzugkraft ($s_M = 35$) stoffschlüssiger Aluminium-Kupfer-Verbindungen (EN AW-1050A und EN CW-008A); hergestellt durch Laserstrahlschweißen (LSS), Kaltgasspritzen (KGS), Dovetail-Walzplattieren (Dovetail), Elektromagnetische Pulstechnologie (EMPT), Ultraschallschweißen (USS), Leitleben und Walzplattieren (*Bruch im Aluminium-Grundwerkstoff)

Im Vergleich zu den Festphasenfügeverfahren weist die laserstrahlgeschweißte Mischverbindung eine bessere Kontaktgütemaßzahl auf ($k_u = 1,06$). Die Ursache hierfür ist eine verringerte elektrische Leitfähigkeit der intermetallischen Phasen der laserstrahlgeschweißten Mischverbindung (vgl. Abschnitt 2.3.6 auf S. 21). Zur Erklärung der weiteren Ergebnisse können die Erkenntnisse aus Abschnitt 5.2 auf die untersuchten Fügeverfahren übertragen werden. Beim Ultraschallschweißen und bei der elektromagnetischen Pulstechnologie wurde eine in y-Richtung durchgängig Kontaktfläche hergestellt ($k_u < 1,0$). Die Ausdehnung der Anbindung in x-Richtung führt zu einer weiteren Verbesserung der Kontaktgütemaßzahl, jedoch spielt dieser Einfluss auch hier eine untergeordnete Rolle. Die ideale Kontaktgütemaßzahl wird durch Walzplattieren nahezu erreicht ($k_u = 0,51$). Als Ursache dafür kann die vollflächige Anbindung innerhalb der Überlappung genannt werden. Diese liegt zwar auch bei den geklebten Verbindungen vor, jedoch beeinträchtigt der Klebstoff die elektrische Leitfähigkeit, da

der Strom lediglich über den elektrisch leitenden Füllstoff übertragen wird (vgl. **Abbildung 7-2 f**). Die Kontaktgütemaßzahlen der KGS- und der Dovetail-Verbindungen liegen ebenfalls unterhalb von $k_u = 1,0$. Im Gegensatz zu artgleichen Verbindungen im Stumpfstoß ($k_{u,ideal} = 1,0$) können durch einen höheren Kupferanteil innerhalb der Messstrecke Verbindungen mit $k_u < 1,0$ erreicht werden (vgl. **Abbildung 7-2 b**) und **c**)).

Deutliche Unterschiede treten jedoch bei der maximalen Zug- bzw. Scherzugkraft auf. Die laserstrahlgeschweißten Verbindungen versagen erwartungsgemäß bereits unterhalb von $F_{max} = 2$ kN. Bis auf die mittels Ultraschallschweißen gefügten Proben versagen die Verbindungen im Aluminium-Grundwerkstoff und nicht in der Fügeverbindung. Daher erweisen sich diese Verfahren zur elektrischen Verbindung der Werkstoffe Aluminium und Kupfer als durchweg geeignet.

7.3.3 Fazit und Auswahl einer Füge­technologie

Um die Zellpole der Anode als Aluminium-Kupfer-Hybrid-Element auszuführen, wurde aufgrund der oben genannten Ergebnisse das Fügeverfahren Walzplattieren ausgewählt. Nach WEIGL ET AL. (2010A, S. 557) tritt zudem bis zu Temperaturen von 150 °C kein Wachstum der intermetallischen Phasen auf. Dies lässt auf eine hohe Langzeitstabilität dieser Verbindung schließen.

Der Hybrid-Zellpol mit walzplattiertem Element wurde von der Firma Panasonic gefertigt und wird in **Abbildung 7-4** gezeigt.

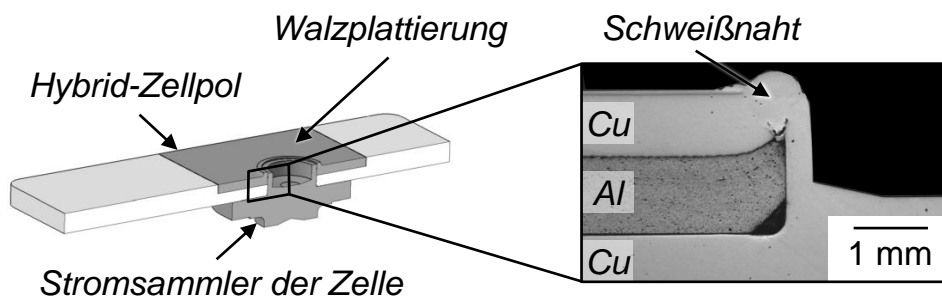


Abbildung 7-4: Aufbau des Hybrid-Zellpols mit walzplattiertem Kupfer-Zwischenelement und Querschliff der geschweißten Kupfer-Verbindung zwischen Stromsammel­er der Zelle und Zellpol; Schweißparameter des gepulsten Lasers: $P_{L,Puls} = 3,9$ kW, $t_{Puls} = 4,0$ ms

Die Verbindung zwischen dem Stromsammler (Anode) und dem Hybrid-Zellpol wurde ebenfalls mittels Laserstrahlschweißen gefügt. Hierbei wurde die Prozessführung so gestaltet, dass während des Fügens ein Aufschmelzen des Aluminium-Trägerbauteils ausgeschlossen war. Dazu wurde analog zur Kathodenseite eine gepulste Laserstrahlquelle eingesetzt (siehe Anhang A2).

Der in Abschnitt 7.3 beschriebenen Inhalt ist eine notwendige Voraussetzung und Mittel zum Zweck, um die Fügeverbindung zwischen Zellpol und Zellverbinder artgleich mit dem Verfahren Laserstrahlschweißen ausführen zu können.

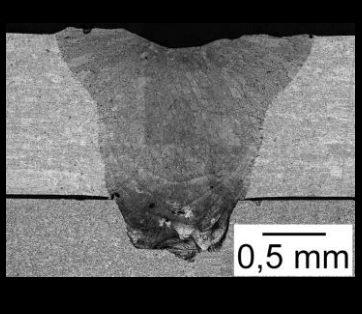
7.4 Laserstrahlschweißen von Zellpol und Zellverbinder

7.4.1 Ermittlung der maximalen Anbindungsfläche

Als Randbedingung für die simulationsgestützte Optimierung der Schweißnahtgeometrie wurde, gemäß Abschnitt 5.3 auf S. 74, die maximal zulässige Anbindungsfläche zwischen Zellpol und Zellverbinder ermittelt. Basierend auf Angaben des Zellherstellers Panasonic darf eine maximale Temperatur des Zellpols während des Schweißprozesses von 80 °C nicht überschritten werden.

In Vorversuchen wurden zunächst geeignete Schweißparameter ermittelt, um den Kontakt zwischen Zellpol und Zellverbinder prozesssicher zu fügen. Hierbei galt es, ein Durchschweißen des Zellpols zu vermeiden, um das darunterliegende Gehäuse der Batteriezelle nicht zu beschädigen. Als Schweißstrategie wurden sowohl Schweißpunkte als auch Steppnähte untersucht. Dabei erwiesen sich Steppnähte als besonders geeignet. Im Gegensatz zu Schweißpunkten wurden bei Steppnähten keine Schmelzbadauswürfe beobachtet. Um die Anbindungsfläche möglichst kreisförmig auszuführen, wurden kurze Steppnähte mit einer Länge von 1,0 mm geschweißt. Die Prozessparameter sowie ein Querschliff einer Steppnaht können **Tabelle 7-1** entnommen werden.

Tabelle 7-1: Prozessparameter mit Querschliff der Steppnaht zur elektrischen Kontaktierung des Batteriemoduls (Werkstoff: EN AW-1050A)

| Prozessparameter | |  |
|--|-----|---|
| Laserleistung P_L in kW | 3,0 | |
| Vorschubgeschwindigkeit v_L in m/min | 1,5 | |
| Streckenenergie S_L in kJ/m | 120 | |
| Länge der Steppnaht l_{Stepp} in mm | 1,0 | |

Die Temperatur wurde mittels Thermoelementen an den Zellpolen gemessen. Aufgrund der Erwärmung des Zellverbinders wurden jeweils die Zellpole überwacht, welche durch denselben Zellverbinder verbunden wurden, da die Temperatur der Zellpole von den benachbarten Kontakten beeinflusst werden kann (siehe **Abbildung 7-5**).

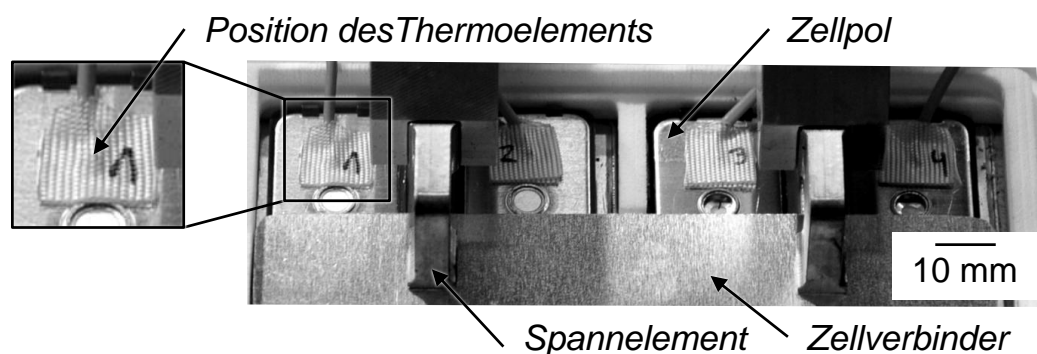


Abbildung 7-5: Versuchsaufbau zur Überwachung der thermischen Belastungen während des Schweißprozesses; Kupfer-Spannelemente werden durch Kunststoffelemente elektrisch isoliert

Um die gegenseitige Beeinflussung der benachbarten Kontakte zu reduzieren, wurden die Spannelemente aus Kupfer ausgelegt, sodass die Wärme in diese Komponenten schnell abfließen kann. Zur elektrischen Isolierung wurden diese mit Kunststoffelementen fixiert. Für diese Untersuchungen wurden jeweils vier Zellen gleichzeitig kontaktiert. Das bedeutet, dass mit zwei Positionen der Scanneroptik gefügt wurde, um Auswirkungen von zu stark variierenden Einstrahlwinkeln auf den Schweißprozess zu vermeiden. Die Steppnähte wurden nacheinander auf den einzelnen Kontakten aufgebracht, um einen möglichst großen zeitlichen Versatz zwischen zwei Schweißprozessen auf einem Zellpol zu errei-

chen. Dadurch wurde die thermische Belastung während des Schweißens gleichmäßig auf die acht Zellpole verteilt, ohne die Prozesszeit der gesamten Fügeaufgabe zu verändern. Mit dieser Prozessführung und den vorliegenden Schweißparametern konnten 15 Steppnähte pro Kontakt aufgebracht werden. Dies entspricht einer Anbindungsfläche von ca. 37,5 mm². Der Verlauf der Temperatur an den Terminals während des Fügeprozesses ist für 15 Steppnähte in **Abbildung 7-6** dokumentiert. Die Prozesszeit betrug 0,6 s pro Kontakt, wobei sich ein zeitlicher Versatz zwischen zwei Steppnähten pro Zellpol von 0,56 s ergab.

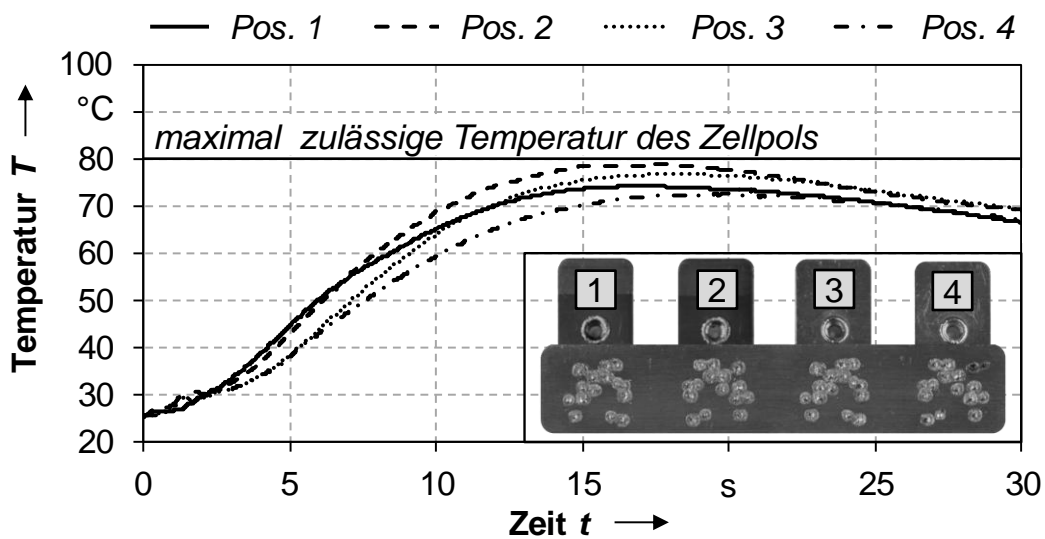


Abbildung 7-6: Temperaturverlauf der Terminals an den Messstellen 1 bis 4 für 15 Steppnähte; Schweißparameter nach **Tabelle 7-1**

Die Verteilung der Anbindungsfläche wurde gemäß dem folgenden Abschnitt 7.4.2 hinsichtlich elektrischer, mechanischer sowie der Kombination von elektrischen und mechanischen Eigenschaften optimiert. Dafür wurden Schweißpunkte mit einem Radius $r_{\text{punkt}} = 0,9$ mm (siehe **Abbildung 7-8**) anstelle von Steppnähten gewählt, um die geschweißte Anbindungsfläche möglichst genau anzunähern. Diese Vereinfachung ist zulässig, da bei der vorliegenden Fügeaufgabe der Unterschied zwischen einer kreisförmigen und einer elliptischen Anbindungsfläche eines Schweißpunktes bzw. einer Steppnaht einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit bzw. die mechanische Spannungsverteilung der Verbindung hat. Wird die gleiche Anbindungsfläche angenommen, liegen die Abweichungen zwischen einem kreisförmigen und einem elliptischen Schweißpunkt im Bereich der Rechengenauigkeiten der FEM-Simulation. Diese wird maßgeblich von der Vernetzung der Bauteile bestimmt.

7.4.2 Simulationsgestützte Optimierung der Schweißnahtgeometrie

Elektrische Optimierung

Im Batteriemodul liegt entsprechend **Abbildung 2-6** auf S. 13 eine serielle Schaltung von je zwei parallel geschalteten Zellen vor. Das Batteriemodul hat somit eine Nennspannung von 14,8 V (4 x 3,7 V) bei einer Kapazität von 50 Ah (2 x 25 Ah). Aufgrund dieser elektrischen Schaltung ergeben sich zwei Kontaktbedingungen, welche in **Abbildung 7-7** schematisch gezeigt werden.

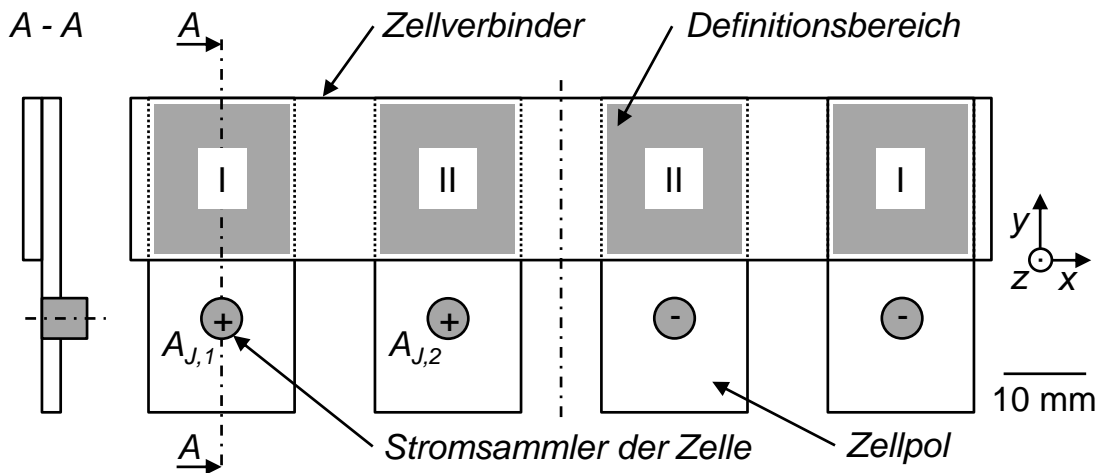


Abbildung 7-7: Schematische Darstellung der Geometrie der Zellverbinder des Batteriemoduls mit den Kontaktbedingungen I und II

Zur elektrischen Optimierung der Schweißpunktverteilung mit 15 Schweißpunkten werden die Kontaktbedingungen I und II getrennt voneinander untersucht. Als Lastfall wird ein Strom von $I_0 = 200$ A pro Zelle angenommen. Dieser Strom entspricht einer Belastung der Zellen bei der Beschleunigung eines Elektrofahrzeugs. Aufgrund der Parallelschaltung von zwei Batteriezellen wird für die Kontaktbedingung I der Strom einer Zelle und für die Kontaktbedingung II der Strom von zwei Zellen zur Optimierung berücksichtigt. Der Strom wird über die Stromsammler in die Kontakte eingespeist. Dies wird in den Simulationsmodellen (vgl. Abschnitt 6.3) durch eine aufgeprägte Stromdichteverteilung ($A_{J,1} = A_{J,2} = 10,19$ A/mm²) auf der Kreisfläche der Stromsammler modelliert. Die elektrischen Lastfälle der Kontaktbedingungen I und II mit einer zufälligen Verteilung der Schweißpunkte sind in **Abbildung 7-8** dokumentiert.

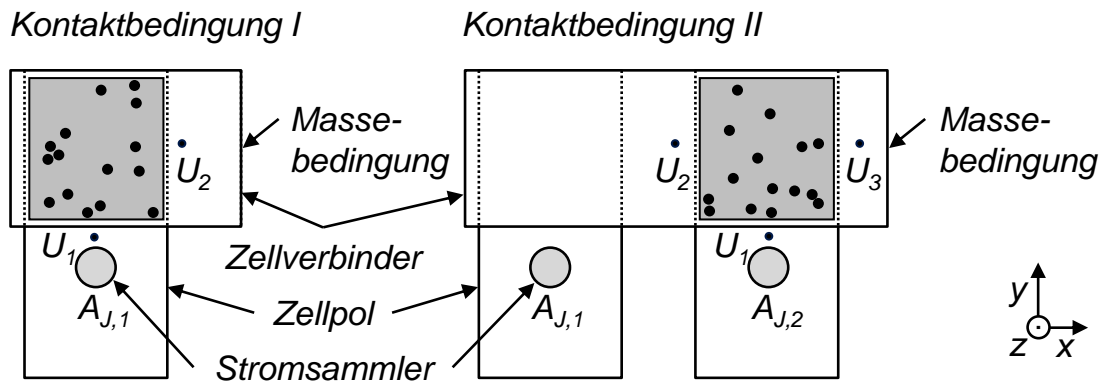


Abbildung 7-8: Definition der Lastfälle zur elektrischen Optimierung der Schweißpunktverteilungen ($r_{\text{Punkt}} = 0,9 \text{ mm}$) für die Kontaktbedingungen I und II

Um die elektrischen Eigenschaften zu optimieren, wird für die Kontaktbedingung I die Potentialdifferenz zwischen U_1 und U_2 als Zielgröße verwendet. Die Zielfunktion entspricht in diesem Fall Gleichung (6-5) auf S. 93. Es gilt:

$$Z_{el,I,j} = \frac{\Delta U_{12}}{\Delta U_{12,ideal}} \quad (7-1)$$

mit

- $Z_{el,I,j}$: Zielfunktion der elektrischen Optimierung der Kontaktbedingung I des Individuums j
- ΔU_{12} : Potentialdifferenz der Schweißpunktverteilung ($U_1 - U_2$)
- $\Delta U_{12,ideal}$: Potentialdifferenz des vollflächig kontaktierten Definitionsbereichs ($U_1 - U_2$)

Für die Kontaktbedingung II werden die Potentialdifferenzen zwischen den Messpunkten U_1 und U_3 sowie U_2 und U_3 zur elektrischen Optimierung herangezogen. Die Zielfunktion zur Optimierung der Kontaktbedingung II ist in Gleichung (7-2) angegeben:

$$Z_{el,II,j} = 0,5 \cdot \left(\frac{\Delta U_{13}}{\Delta U_{13,ideal}} + \frac{\Delta U_{23}}{\Delta U_{23,ideal}} \right) \quad (7-2)$$

mit

- $Z_{el,II,j}$: Zielfunktion der elektrischen Optimierung der Kontaktbedingung II des Individuums j
- ΔU_{13} : Potentialdifferenz der Schweißpunktverteilung ($U_1 - U_3$)
- $\Delta U_{13,ideal}$: Potentialdifferenz des vollflächig kontaktierten Definitionsbereichs ($U_1 - U_3$)

- ΔU_{23} : Potenzialdifferenz der Schweißpunktverteilung ($U_2 - U_3$)
 $\Delta U_{23,ideal}$: Potenzialdifferenz des vollflächig kontaktierten Definitionsbereichs ($U_2 - U_3$)

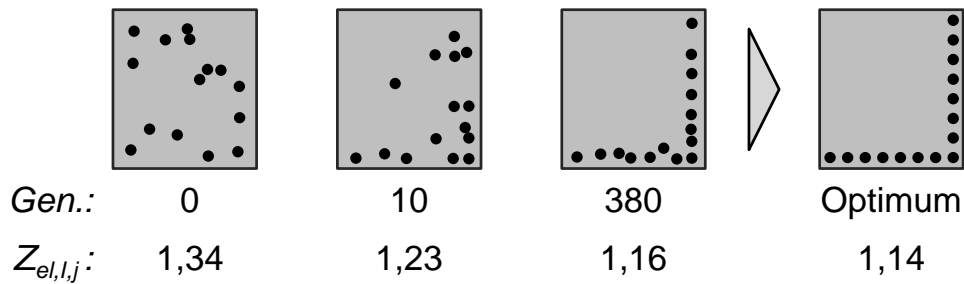
Zur Optimierung beider Lastfälle haben sich folgende Parameter des GA als besonders geeignet erwiesen (vgl. auch Abschnitt 6.3.3 auf S. 97):

- Turnierselktion: $n_t = 4$
- Populationsgröße: $n_p = 30$
- Anteile der genetischen Operatoren: $P_E = 0,067$, $P_R = 0,733$ und $P_M = 0,2$ nach Gleichung (6-2) und (6-3)
- Abbruchkriterium: $z_G = 10$; $Z_{j,k,min} = 0,01$

Die Modellierung der Kontaktbedingungen wurde analog zu der in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen thermoelektrischen FEM-Simulation durchgeführt. Die Ergebnisse der Optimierung werden für die Kontaktbedingung I in **Abbildung 7-9 a)** und für die Kontaktbedingung II in **Abbildung 7-9 b)** gezeigt. Nach Abbruch der Optimierung liegt ein Zielfunktionswert von $Z_{el,I,j} = 1,16$ bzw. $Z_{el,II,j} = 1,17$ vor. Basierend auf diesen Schweißpunktverteilungen konnte ein Optimum manuell abgeleitet werden. Diese Verteilungen wurden anschließend mit Hilfe der *erweiterten Initialisierung* gemäß **Abbildung 6-7** in die letzte Generation der Optimierung rückgeführt. Die Zielfunktionswerte konnten weiter verbessert werden ($Z_{el,I,Optimum} = 1,14$ und $Z_{el,II,Optimum} = 1,16$), sodass von den Optima der Schweißpunktverteilungen ausgegangen werden kann.

Der ideale Verbindungswiderstand der vollflächig kontaktierten Verbindung der Kontaktbedingung I ergibt sich aufgrund der Potenzialdifferenz $\Delta U_{12,ideal}$ zu $R_{ideal,I} = 9,82 \mu\Omega$. Somit liegt der optimierte Verbindungswiderstand des berechneten Optimums bei $R_{Optimum,I} = 11,19 \mu\Omega$. Für die Kontaktbedingung II kann der ideale Verbindungswiderstand mit Hilfe des Mittelwerts der Potenzialdifferenzen $\Delta U_{13,ideal}$ und $\Delta U_{23,ideal}$ angegeben werden. Der Betrag des Stroms, welcher zwischen den Messpunkten U_1 und U_3 bzw. U_2 und U_3 fließt, kann nicht exakt bestimmt werden, da sich die Ströme beider Stromsammler innerhalb der Messstrecken überlagern und gegenseitig beeinflussen. Deshalb wurde für die Widerstandsberechnung der Kontaktbedingung II der gleiche Stromfluss von 200 A zwischen den Messpunkten U_1 und U_3 bzw. U_2 und U_3 angenommen. Der ideale Verbindungswiderstand der Kontaktbedingung II $R_{ideal,II}$ beträgt in diesem Fall $12,09 \mu\Omega$. Der Widerstand der optimalen Schweißpunktverteilung berechnet sich dann zu $R_{Optimum,II} = 14,03 \mu\Omega$.

a) Kontaktbedingung I



b) Kontaktbedingung II

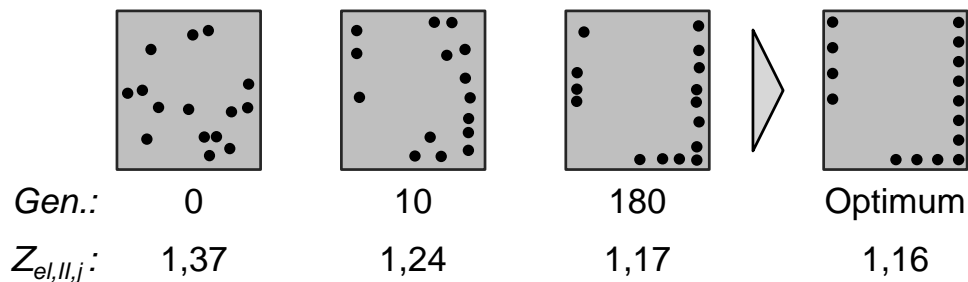


Abbildung 7-9: Ergebnisse der elektrischen Optimierung (bestes Individuum der jeweiligen Generation) sowie die abgeleiteten Optima der Kontaktbedingung I (a) und II (b)

Mechanische Optimierung

Die mechanische Optimierung wurde ebenfalls mit 15 Schweißpunkten durchgeführt. Als Lastfall wurden mechanische Beanspruchungen der Zellpole untersucht, welche aufgrund des Alterungsverhaltens der Lithium-Ionen-Zellen auftreten. Durch Lade- bzw. Entladevorgänge der Zellen bewirken Alterungseffekte eine Volumenänderung der Anoden- und Kathodenbeschichtung der Elektroden (LEE ET AL. 2003, S. 835), wodurch die Dicke der Batteriezellen zunimmt. Dies führt bei prismatischen Zellen zu einem seitlichen Ausbauchen in x-Richtung und kann durch elastische Verformungen den Abstand zwischen zwei benachbarten Zellpolen um wenige zehntel Millimeter vergrößern. Dieser komplexe Lastfall wurde für die vorliegende Betrachtung stark vereinfacht und es wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- Das Ausbauchen der Zellen erfolgt ausschließlich in x-Richtung.
- Es tritt keine Verdrehung der Zellen auf.
- Alle Zellen weisen dieselbe Volumenänderung auf.

Unter diesen Randbedingungen erfahren die an den Stromsammlern verschweißten Zellpole und Zellverbinder die in **Abbildung 7-10** schematisch illustrierten

Formänderungen. Sie sind stark überhöht dargestellt, um den Einfluss der Verschiebungen der Zellpole zu verdeutlichen.

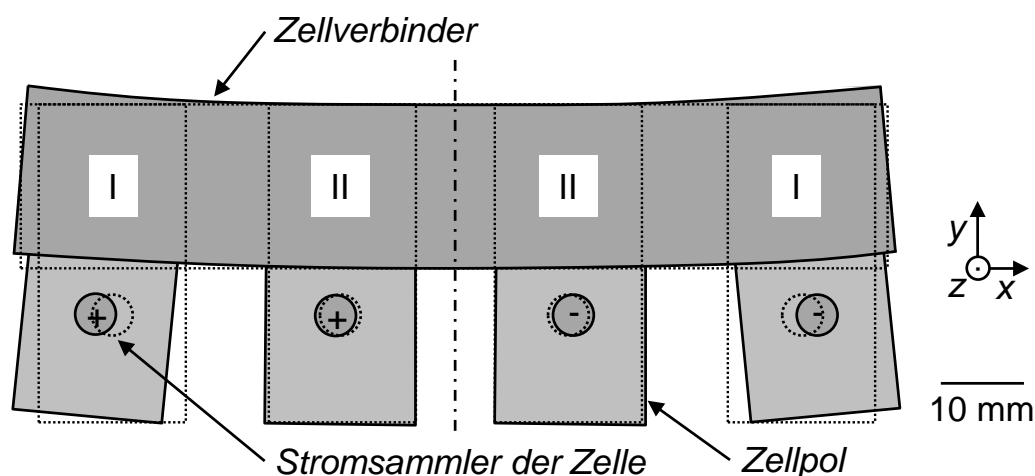


Abbildung 7-10: Schematische Darstellung der Formänderungen der vollflächig verbundenen Zellpole und Zellverbinder im Falle eines Ausbauchens der Zellen

Die Stromsammelndeckelung bewegt sich ausschließlich in x-Richtung, wodurch eine Verdrehung der Zellpole erfolgt. Für diese Untersuchung wird von einer vollflächigen Verbindung zwischen Zellpol und Zellverbinder ausgegangen. Die relative Verschiebung zwischen Zellpol und Zellverbinder der Kontaktbedingung II ist im Vergleich zur Kontaktbedingung I sehr gering und führt zu einer vernachlässigbaren mechanischen Belastung der Fügeverbindungen. Daher wird für die mechanische Optimierung lediglich Kontaktbedingung I untersucht.

Zur Modellierung dieses Lastfalls wird das Ausbauchen bzw. die Verschiebung der Stromsammelndeckelung durch eine an der Verbindung zwischen Stromsammelndeckelung und Zellpol angreifende Kraft $F_x = 200 \text{ N}$ abgebildet. Dieser Wert wurde angenommen, um technisch sinnvolle mechanische Spannungen im elastischen Bereich des eingesetzten Werkstoffs zu erhalten. Bei einer Variation der Kraft F_x ändern sich zwar die Beträge der berechneten Spannungen, die Spannungsverteilung wird davon jedoch nicht beeinflusst. Das bedeutet, dass eine Optimierung der Schweißpunktverteilung unabhängig von dem Betrag der angreifenden Kraft erfolgen kann.

Der Zellverbinder wird freigeschnitten und in der elastomechanischen FEM-Simulation (vgl. Abschnitt 6.4.2) mit Hilfe einer festen Einspannung vereinfacht modelliert (siehe **Abbildung 7-11**).

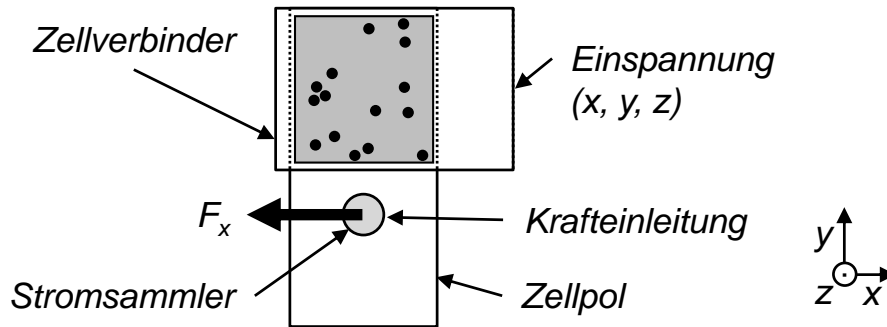


Abbildung 7-11: Definition des Lastfalls zur mechanischen Optimierung der Schweißpunktverteilung für die Kontaktbedingung I

Um die mechanischen Eigenschaften zu optimieren, wird analog zu Abschnitt 6.4 die mittlere maximale Knotenspannung der Schweißpunkte verwendet. Die Zielfunktion zur Optimierung der Kontaktbedingung I ist in Gleichung (7-3) angegeben:

$$Z_{m,l,j} = \sigma_{max,j} = \max(\bar{\sigma}_{k,l,j}) \quad (7-3)$$

mit

$Z_{m,l,j}$: Zielfunktion der mechanischen Optimierung der Kontaktbedingung I des Individuums j

Zur Optimierung dieses Lastfalls wurde der genetische Algorithmus mit den folgenden Werten parametrisiert (vgl. Abschnitt 6.4.3 auf S. 106):

- Turnierselktion: $n_t = 4$
- Populationsgröße: $n_p = 50$
- Anteile der genetischen Operatoren: $P_E = 0,04$, $P_R = 0,68$ und $P_M = 0,28$ nach Gleichung (6-2) und (6-3)
- Abbruchkriterium: $z_G = 5$; $Z_{j,k,min} = 1 \text{ N/mm}^2$

Die Ergebnisse der Optimierung sind für die Kontaktbedingung I in **Abbildung 7-12** dokumentiert. Nach Abbruch der Optimierung lag ein Zielfunktionswert von $Z_{m,l,j} = 31 \text{ N/mm}^2$ vor. Basierend auf dieser Schweißpunktverteilung konnte durch eine gleichmäßige manuelle Ausrichtung einzelner Schweißpunkte ein Optimum abgeleitet werden. Diese Verteilung wurde anschließend mittels der erweiterten Initialisierung in die letzte Generation der Optimierung eingeführt. Die Zielfunktionswerte konnten dadurch weiter verbessert werden ($Z_{m,l,Optimum} = 28 \text{ N/mm}^2$), sodass von dem mechanischen Optimum der Schweißpunktverteilung ausgegangen werden kann.

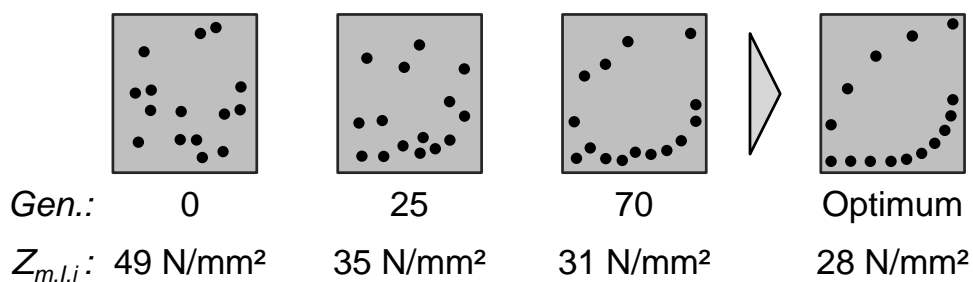
Kontaktbedingung I

Abbildung 7-12: Ergebnisse der mechanischen Optimierung (bestes Individuum der jeweiligen Generation) sowie das abgeleitete Optimum der Kontaktbedingung I

Multikriterielle Optimierung

Für die multikriterielle Optimierung wird für die Kontaktbedingung I sowohl der elektrische als auch der mechanische Lastfall berücksichtigt. Wie bereits in Abschnitt 6.5 beschrieben, werden die elektrischen Eigenschaften optimiert, wobei eine zulässige Grenzspannung σ_{zul} nicht überschritten werden darf. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wird die zulässige Grenzspannung als Mittelwert der Spannungen des elektrischen Optimums der Kontaktbedingung I ($Z_{m,I,el.Optimum} = 41 \text{ N/mm}^2$) und des mechanischen Optimums ($Z_{m,I,Optimum} = 28 \text{ N/mm}^2$) zu $\sigma_{zul} = 35 \text{ N/mm}^2$ gewählt.

Die Zielfunktion zur multikriteriellen Optimierung der Kontaktbedingung I wird in Gleichung (7-4) angegeben:

$$Z_{el,m,l,j} = Z_{el,l,j} + Z_{T,j} \quad (7-4)$$

mit

$Z_{el,m,l,j}$: Zielfunktion der multikriteriellen Optimierung der Kontaktbedingung I des Individuums j

Die Zielfunktion $Z_{el,l,j}$ ist in diesem Fall das Verhältnis aus ΔU_{I2} und der Potenzi-
aldifferenz des Optimums der Kontaktbedingung I $\Delta U_{Optimum,I}$. Dies ermöglicht
einen direkten Vergleich der multikriteriellen Lösungen mit dem Optimum der
elektrischen Berechnungen. Als Strafterm-Parameter ξ wurde der Wert 0,95 fest-
gelegt. Wird bei einem Individuum σ_{zul} überschritten, erhöht sich der Zielfunktionswert um $\xi-1$, vgl. Gleichung (6-15). **Abbildung 7-13** verdeutlicht diese Zusammenhänge zwischen dem Zielfunktionswert $Z_{el,l,j}$ und dem elektrischen Wi-

derstand der Kontaktbedingung I $R_{I,j}$ sowie zwischen dem Zielfunktionswert $Z_{T,I,j}$ und der auftretenden Spannung $\sigma_{max,j}$.

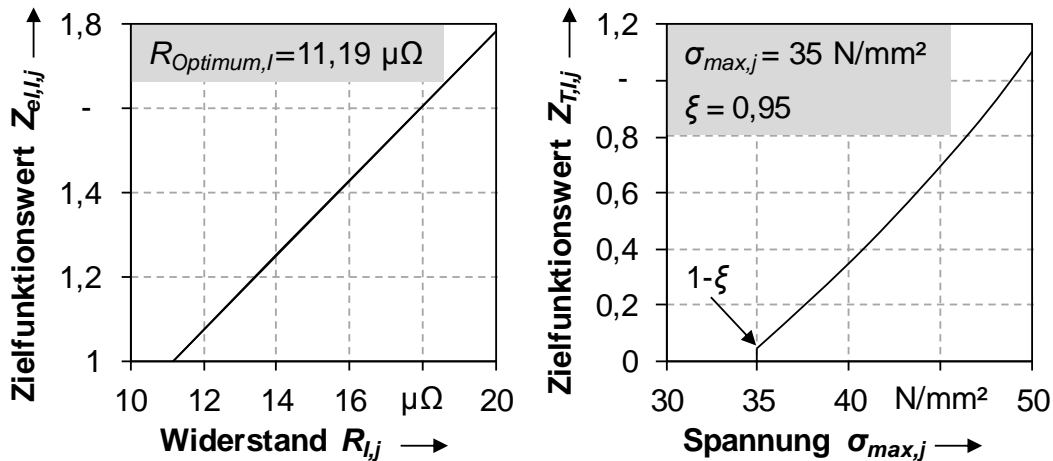


Abbildung 7-13: Zusammenhang zwischen dem Zielfunktionswert der elektrischen Berechnung $Z_{el,I,j}$ und dem Widerstand $R_{I,j}$ (links) sowie zwischen dem Zielfunktionswert der mechanischen Berechnung $Z_{T,I,j}$ und der Spannung $\sigma_{max,j}$ (rechts)

Zur Berechnung der multikriteriellen Lösungen wurde der genetische Algorithmus mit den Werten der mechanischen Optimierung parametrisiert:

- Turnierselktion: $n_t = 4$
- Populationsgröße: $n_p = 50$
- Anteile der genetischen Operatoren: $P_E = 0,04$, $P_R = 0,68$ und $P_M = 0,28$ nach Gleichung (6-2) und (6-3)
- Abbruchkriterium: $z_G = 5$; $Z_{j,k,min} = 0,01$

Die Ergebnisse der Optimierung sind für die Kontaktbedingung I in **Abbildung 7-14** dokumentiert. Nach Abbruch der Optimierung liegt ein Zielfunktionswert von $Z_{el,m,I,j} = 1,08$ vor. Basierend auf dieser Lösung konnte mit Hilfe der erweiterten Initialisierung das Optimum erreicht werden. Der Zielfunktionswert wurde weiter verbessert und zu $Z_{el,m,I,Optimum} = 1,03$ berechnet. Somit liegt der Widerstand $R_{I,el,m,Optimum}$ bei $11,53 \mu\Omega$. Die maximal auftretende Spannung $\sigma_{max,el,m,Optimum}$ beträgt für diese Lösung $30 N/mm^2$ und ist damit kleiner als σ_{zul} .

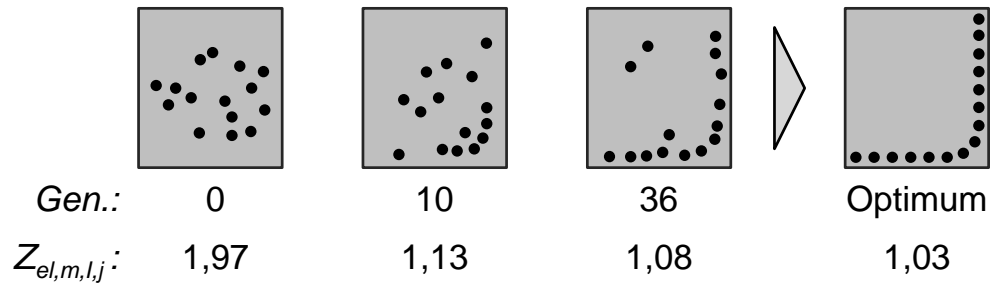
Kontaktbedingung I

Abbildung 7-14: Ergebnisse der multikriteriellen Optimierung (bestes Individuum der jeweiligen Generation) sowie das abgeleitete Optimum der Kontaktbedingung I

Zwischenfazit

Die bisherigen Ergebnisse haben gezeigt, dass die Methode der simulationsgestützten Auslegung elektrischer Kontakte für die elektrische und mechanische Beanspruchung sowie für die Kombination beider Fälle Lösungen bietet. Je nach Lastfall kann die optimale Konfiguration der Schweißnaht bei der Verbindung zwischen Zellpol und Zellverbinder gefunden werden.

7.5 Batteriemodul mit optimierter Schweißnahtgeometrie**7.5.1 Allgemeines**

Um eine technologische und wirtschaftliche Bewertung der elektrischen Kontaktierung mittels Laserstrahlschweißen durchzuführen, wurde das bereits vorgestellte Batteriemodul aufgebaut. Bei der Verbindung zwischen Zellpol und Zellverbinder wurde die elektrisch optimierte Schweißnahtkonfiguration entsprechend **Abbildung 7-9** ausgewählt. Auf die Anwendung der multikriterielle Auslegung wurde verzichtet, da die elektrischen Eigenschaften des Batteriemoduls im Zentrum dieser Arbeit stehen.

In **Abbildung 7-15** wird das Batteriemodul mit elektrisch optimierter Schweißnahtgeometrie dargestellt. Basierend auf dieser Variante wurde ein ganzheitlicher, d. h. technologischer und wirtschaftlicher Vergleich mit dem Verfahren Schrauben durchgeführt.

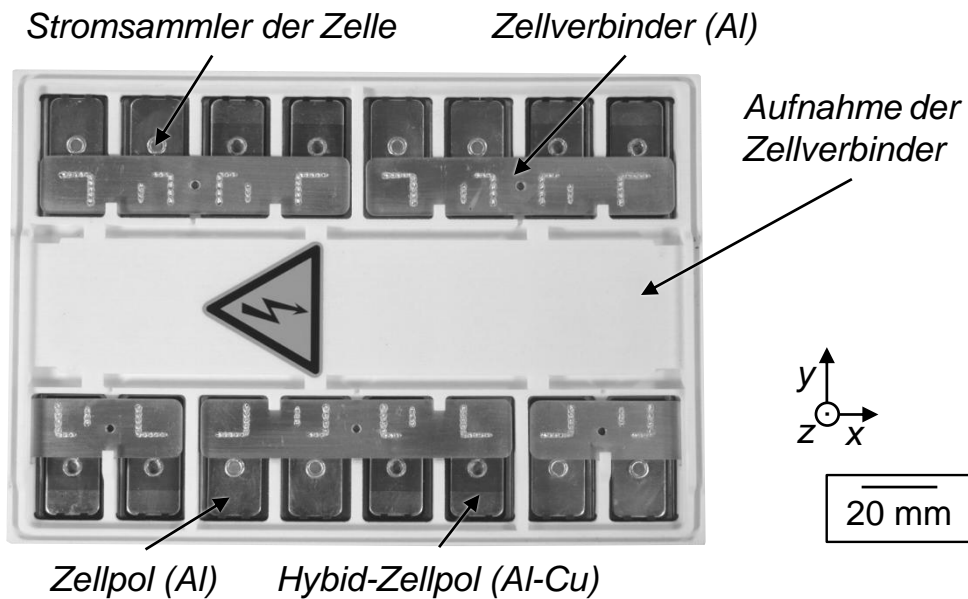


Abbildung 7-15: Kontaktiertes Batteriemodul mit elektrisch optimierter Schweißnahtgeometrie; Schweißparameter: $P_L = 3,0 \text{ kW}$, $v_L = 1,5 \text{ m/min}$, $l_{\text{Stepp}} = 1,0 \text{ mm}$

7.5.2 Technologische Bewertung

Das Laserstrahlschweißen weist gegenüber konventionellen Verfahren zur elektrischen Kontaktierung, wie beispielsweise dem Schrauben, zahlreiche Vorteile auf (siehe **Tabelle 2-6** auf S. 25). Anhand des vorgestellten Batteriemoduls mit acht Lithium-Ionen-Zellen können diese Vorteile quantifiziert werden.

In **Tabelle 7-2** ist das technologische Potenzial in den Bereichen *Leichtbau*, *Produktion* und *Funktion* beim Laserstrahlschweißen der Kontakte des Batteriemoduls dokumentiert. Die Masse des Batteriemoduls kann im Vergleich zu einer geschraubten Kontaktierung (vgl. **Abbildung 2-12** auf S. 27) um 17,5 g pro Zelle reduziert werden. Zudem lässt sich der Bauraum in z-Richtung deutlich verringern. Gleiches gilt für die Fertigungszeit der Kontaktierung des Batteriemoduls, welche dann lediglich 20 s beträgt. Dabei liegt die Prozesszeit bei 0,6 s pro Kontakt und die Zeit für den Positionswechsel der Scanneroptik bei 4,8 s. Die übrige Fertigungszeit wird für die Betätigung der Spanntechnik benötigt. Um den Verbindungswiderstand eines geschraubten Kontakts mit gleicher Geometrie des Zellverbinders zu bestimmen, wurde ein Batteriemodul mit geschraubter Kontaktierung aufgebaut und der Verbindungswiderstand am Beispiel von Kontaktbedingung I bestimmt (siehe **Abbildung 11-1** in Anhang A3). Dieser liegt bei einem geschraubten Kontakt mit Aluminium-Zellpol bei $R_{12, \text{Schrauben}} = 35 \mu\Omega$. Im

Vergleich dazu wurde ein Widerstand der Kontaktbedingung I des geschweißten Moduls mit Aluminium-Zellpol von $R_{12,LSS} = 12 \mu\Omega$ gemessen. Die Abweichung zum berechneten Wert $R_{Optimum,I} = 11,19 \mu\Omega$ beträgt 7%. Basierend auf dieser Messung kann der Verbindungswiderstand durch eine geschweißte Verbindung um 66% verbessert werden. Die Verbindungswiderstände R_{12} wurden anhand der Kontaktbedingung I des Batteriemoduls mit der Vier-Leiter-Messmethode an den Messstellen U_1 und U_2 entsprechend **Abbildung 7-8** bestimmt.

Tabelle 7-2: Technologisches Potenzial der elektrischen Kontaktierung des Batteriemoduls mittels Laserstrahlschweißen (LSS) im Vergleich zur Schraubkontaktierung

| Leichtbau | Schrauben | LSS |
|---|------------------|----------------|
| Masse der Zellpole | 25,5 g/Zelle | 8 g/Zelle |
| Bauraumreduzierung, ausgedrückt durch Δh_z | 0 | -7,5 mm |
| Produktion | | |
| Prozesszeit pro Kontakt | 5 s ⁴ | 0,6 s |
| Fertigungszeit pro Batteriemodul | 80 s | 20 s |
| Funktion | | |
| Verbindungswiderstand R_{12} (Kontaktbedingung I) | 35 $\mu\Omega$ | 12 $\mu\Omega$ |

7.5.3 Wirtschaftliche Bewertung

Nach der Erläuterung der technologischen Potenziale werden die Fertigungsprozesse Schrauben und Laserstrahlschweißen nun unter wirtschaftlichen Aspekten einer ganzheitlichen Kosten-Nutzen-Betrachtung unterzogen. 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 eine jährliche Zielstückzahl berücksichtigt wurden. Die notwendigen Daten der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind dem Anhang A4 zu entnehmen.

⁴ Prozesszeit pro geschraubtem Kontakt nach PAULESER & SCHMIDT (2014)

Als Grundlage zur Berechnung der Maschinenstundensätze wurde für das Schrauben eine Hand-Schraubanlage mit manueller Zuführung der Muttern festgelegt. Der Maschinenstundensatz beträgt bei dieser Anlagenkonfiguration 1,94 €/h. Für das Laserstrahlschweißen wurde ein Laserbearbeitungszentrum definiert, welches eine Laserstrahlquelle, eine Scanneroptik, einen Kühler und eine Laserzelle beinhaltet. Bei diesem Anlagenkonzept liegt aufgrund der hohen Anschaffungskosten des Laserbearbeitungszentrums (550.000 €) ein Maschinenstundensatz von 43,68 €/h vor. Dennoch überwiegt der Vorteil einer deutlich höheren Ausbringung des Laserbearbeitungszentrums (64 Module pro Stunde) im Vergleich zur Schraubanlage (29 Module pro Stunde).

Der damit berechnete *Break-even* wird bei einer jährlichen Stückzahl von 98.708 Batteriemodulen erreicht. Ab dieser Stückzahl bedarf es mehrerer Schraubanlagen, was zu Mehrkosten führt. Erst bei einer jährlichen Stückzahl von 217.160 Batteriemodulen werden zwei Laserbearbeitungszentren benötigt. Unter der konservativen Annahme, dass zwei Strahlquellen beschafft werden müssen, steigen die Fügekosten ab dieser Stückzahl sprunghaft an. In **Abbildung 7-16** sind dazu die jährlichen Fügekosten in Abhängigkeit der gefertigten Batteriemodule pro Jahr dokumentiert.

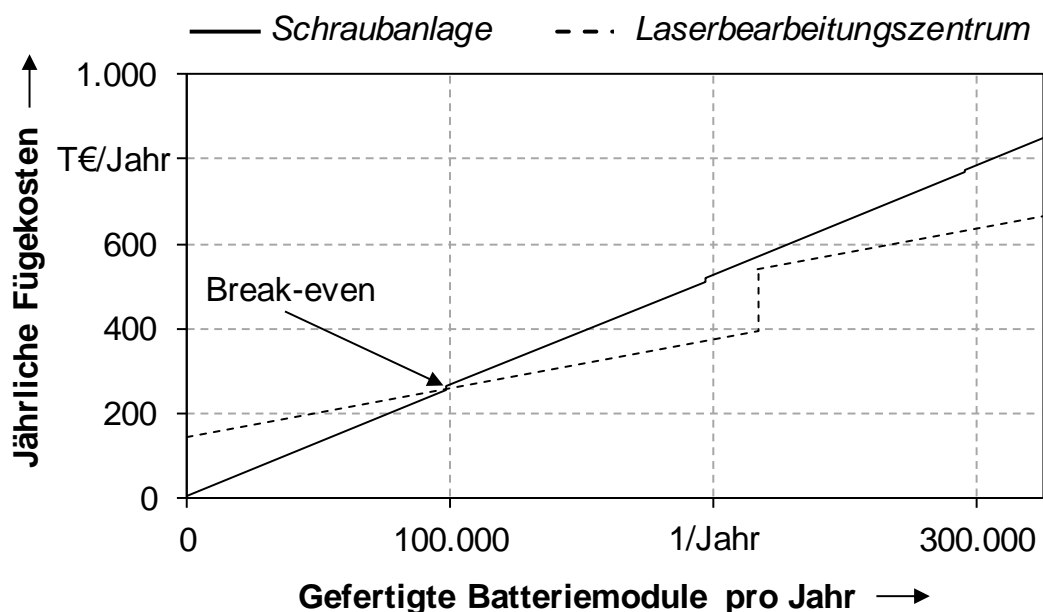


Abbildung 7-16: Gegenüberstellung der jährlichen Fügekosten in Abhängigkeit der gefertigten Batteriemodule pro Jahr für die Fertigungstechnologien Schrauben und Laserstrahlschweißen

Bei einem angenommenen Produktionsszenario von 10.000 bis 25.000 Hybridfahrzeugen mit 104 Lithium-Ionen-Zellen pro Jahr (13 Batteriemodule je Fahrzeug) lässt sich ein jährlicher Bedarf von 130.000 bis 325.000 Batteriemodulen ableiten. Damit wird der Break-even für eine wirtschaftliche Fertigung in jedem Fall erreicht. Dies gilt auch für Elektrofahrzeuge, da die Anzahl der benötigten Zellen pro Fahrzeug deutlich höher liegt.

7.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Batteriemodul vorgestellt, welches als Anwendungsbeispiel für die simulationsgestützte Auslegung laserstrahlgeschweißter Kontakte diente. Um ein artgleiches Fügen der elektrischen Kontakte zu gewährleisten, wurde der Zellpol der Anode als walzplattiertes Aluminium-Kupfer-Hybridbauteil ausgelegt. Anschließend konnte die optimale Verteilung der Anbindungsfläche hinsichtlich elektrischer, mechanischer sowie der Kombination beider Eigenschaften ermittelt werden. Die elektrisch optimierte Schweißnahtkonfiguration wurde zur Kontaktierung des Batteriemoduls ausgewählt und umgesetzt.

Anhand der technologischen Bewertung konnte nachgewiesen werden, dass das Laserstrahlschweißen im Hinblick auf die Kriterien Masse der Verbindung, Bauraum, Produktionszeit und Funktion (elektrischer Widerstand) dem Schrauben überlegen ist. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass bei einer jährlichen Stückzahl von Batteriemodulen, wie sie derzeitige Produktionsszenarios von Elektro- oder Hybridfahrzeugen erwarten lassen, die Kontaktierung mittels Laserstrahlschweißen auch in Bezug auf die Fertigungskosten gegenüber dem Schrauben einen signifikanten Wettbewerbsvorteil bietet.

8 Schlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Elektrische Kontakte von Lithium-Ionen-Zellen in Hochvoltspeichern für Elektro- und Hybridfahrzeuge müssen hohen Anforderungen bezüglich der Gesichtspunkte *Leichtbau*, *Produktion*, *Funktion* und *Fertigungskosten* genügen. In der vorliegenden Arbeit wurde mit dem Einsatz des Laserstrahlschweißens ein innovativer Fertigungsprozess entwickelt, um die einzelnen Batteriezellen miteinander zu verbinden. Eine entscheidende Randbedingung bzw. Anforderung stellt dabei ein möglichst geringer Verbindungswiderstand dar, wobei die diesen bestimmende Anbindungsfläche durch den maximal möglichen Wärmeeintrag limitiert ist.

In einer Lithium-Ionen-Zelle liegen sowohl Aluminium- als auch Kupfer-Stromsammler vor, die mit einem Aluminium-Zellverbinder zu kontaktieren sind. Um ein artgleiches Fügen der Kontakte mittels Laserstrahlschweißen zu ermöglichen, wurde der Aluminium-Kupfer-Übergang in die Anode der Zelle gelegt. Dazu wurde ein walzplattiertes Aluminium-Kupfer-Hybridelement eingesetzt. Diese Hybridverbindung erwies sich im Vergleich zu weiteren Fügeverfahren als besonders geeignet, da in ihr eine annähernd ideale elektrische Verbindung bei hoher mechanischer Festigkeit vorliegt.

Zentraler Teil der Arbeit war die Optimierung des Laserschweißprozesses für artgleiche Verbindungen der Werkstoffe Aluminium bzw. Kupfer hinsichtlich elektrischer Eigenschaften. Hierzu wurde in grundlegenden Untersuchungen sowohl die Prozessführung als auch die Geometrie der Schweißnähte berücksichtigt. Als Voraussetzung zur Bewertung der elektrischen Eigenschaften wurde ein Prüfstand zur hochgenauen Widerstandsmessung aufgebaut. Während des Fügeprozesses wurde die thermische Belastung der Kontaktstelle für unterschiedliche Schweißstrategien verglichen. Mit Hilfe von Schweißpunkten oder Steppnähten gelang es, hoch leitfähige Kontakte mit geringer thermischer Belastung herzustellen.

Die experimentellen Untersuchungen wurden durch eine Methode zur simulationsgestützten Auslegung elektrischer Kontakte ergänzt. Dies bot die Möglichkeit, elektrische, mechanische oder eine Kombination beider Lastfälle zu berücksichtigen. Durch die Kopplung eines genetischen Algorithmus mit thermoelektri-

schen sowie elastomechanischen Simulationsmodellen der Kontakte konnte das jeweils optimale Schweißnahtmuster gefunden werden. Die Optimierungsmethode wurde erfolgreich auf ein Batteriemodul mit acht Lithium-Ionen-Zellen angewendet. Anhand dieses Demonstrator-Moduls wurde eine technologische und wirtschaftliche Bewertung des entwickelten Fügeprozesses durchgeführt und es wurden die Potenziale hinsichtlich der Masse, des Bauraums, der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Fertigungszeit quantifiziert. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein optimierter Fertigungsprozess mittels Laserstrahlschweißen sowohl unter Funktions- als auch Kostenaspekten bei der Serienfertigung von Batteriemodulen anderen Verbindungstechniken, wie beispielsweise dem Schrauben, überlegen ist.

8.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit belegt, dass das Fügen der Zellkontakte mittels Laserstrahlschweißen unter technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten erhebliches Potenzial aufweist. An die erarbeiteten Ergebnisse kann direkt angeknüpft werden.

Die Betrachtung der thermischen Belastung der Kontaktstellen während des Schweißprozesses muss weitergeführt werden. Die Vorgaben der Zellhersteller, welche lediglich maximal zulässige Temperaturen an einzelnen Bereichen der Batteriezelle angeben, sind nicht ausreichend. Um eine tatsächliche Schädigung der Zellen auszuschließen, muss die mögliche Anbindungsfläche sehr konservativ ausgelegt werden. Die Berücksichtigung der Wärmeleitung über die Ableiter im Inneren der Zellen muss daher erfolgen, um die Temperaturen an den wärmeempfindlichen Komponenten einer Lithium-Ionen-Zelle zu bestimmen. Dies kann mit Hilfe der numerischen Modellierung des Schweißprozesses unter Berücksichtigung des Aufbaus der Zellen erfolgen. Mit diesem zusätzlichen Lösungsbaustein kann die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur simulationsgestützten Auslegung der elektrischen Kontakte erweitert werden, um die Anzahl zulässiger Schweißpunkte bzw. die maximale Anbindungsfläche als weitere Optimierungsvariable einzubinden.

9 Literaturverzeichnis

AGILENT 2011

Agilent Technologies: Agilent N8700 Series. Datenblatt. Santa Clara, California, 2011, S. 4.

ARAKI & SATO 2003

Araki, K.; Sato, N.: Chemical transformation of the electrode surface of lithium-ion battery after storing at high temperature. In: Journal of Power Sources (2003) 124, S. 124-132.

BLOM ET AL. 2003

Blom, A.; Dunias, P.; van Engen, P.; Hoving, W.; Kramer, J. de: Process spread reduction of laser microspot welding of thin copper parts using real-time control. In: Pique, A. et al. (Hrsg.): Photon processing in microelectronics and photonics II. San Jose, USA, 27.-30.01.2003. Bellingham: SPIE (2003), S. 493-507. ISBN: 978-0-8194-4777-7.

BOEHME 2005

Böhme, H.: Mittelspannungstechnik. Schaltanlagen berechnen und entwerfen. 2. Auflage. Berlin: Huss Medien GmbH, 2005. ISBN: 3-341-01495-0.

BRAND ET AL. 2013A

Brand, M.; Gläser, S.; Geder, J.; Menacher, S.; Obpacher, S.; Jossen, A.; Quinger, D.: Electrical safety of commercial Li-ion cells based on NMC and NCA technology compared to LFP technology. In: A. F. Aghili (Hrsg.): Proceedings of the 27th international Electric Vehicle Symposium (EVS27). Barcelona, Spanien, 17.-20.11.2013. Barcelona: AVERA (2013), S. 1-9.

BRAND ET AL. 2013B

Brand, M.; Gottschaller, S.; Jossen, A.: Stromverteilung bei parallel geschalteten Lithium-Ionen-Zellen. In: Jamal, R. et al. (Hrsg.): Virtuelle Instrumente in der Praxis 2013. Fürstfeldbruck, 23.-24.10.2013. Berlin: VDE Verlag (2013). ISBN: 978-3-8007-3489-4.

BRANDES ET AL. 1998

Brandes, E. A.; Brook, G. B.; Smithells, C. J.: Smithells Metals Reference Book. 7. Auflage. Oxford, Boston: Butterworth-Heinemann, 1998. ISBN: 0750636246.

BRAUNOVIC 2007

Braunovic, M.: Reliability of power connections. In: Journal of Zhejiang University SCIENCE A 8 (2007) 3, S. 343-356.

BRAUNOVIC & ALEXANDROV 1994

Braunovic, M.; Alexandrov, N.: Intermetallic compounds at aluminum-to-copper and copper-to-tin electrical interfaces. In: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A 17 (1994) 1, S. 78-85.

BRAUNOVIC ET AL. 2007

Braunovic, M.; Konchits, V. V.; Myshkin, N. K.: Electrical Contacts. Fundamentals, Applications and Technology. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN: 978-1-57444-727-9. (Electrical and Computer Engineering 132).

BRAUNREUTHER 2014

Braunreuther, S.: Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen: Dissertation. Technische Universität München 2014. München: Utz. ISBN: 978-3-8316-4348-6. (*iwb*-Forschungsberichte Band 283).

CAO ET AL. 2003

Cao, X.; Wallace, W.; Immarigeon, J.-P.; Poon, C.: Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. II. Metallurgical Microstructures, Defects, and Mechanical Properties. In: Materials and Manufacturing Processes 18 (2003) 1, S. 23-49.

DAUB 2012

Daub, R.: Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen: Dissertation. Technische Universität München, 2012. München: Utz. ISBN: 978-3-8316-4199-4. (*iwb*-Forschungsberichte Band 263).

DAUB ET AL. 2013

Daub, R.; Schilp, H.-J.; Wiedenmann, R.: Laser Welding of Copper. In: Dilger, K. et al. (Hrsg.): Joining in Car Body Engineering. Bad Nauheim, 16.-18.04.2013. : Hannover: Vincentz Network GmbH, 2013, S. 207-219.

DIN EN 485-2

DIN EN 485-2: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bänder, Bleche und Platten - Teil 2: Mechanische Eigenschaften. Berlin: Beuth 08/2013.

DIN EN 13599

DIN EN 13599: Kupfer und Kupferlegierungen - Platten, Bleche und Bänder aus Kupfer für die Anwendung in der Elektrotechnik. Berlin: Beuth 11/2013.

DIN EN 60584

DIN EN 60584: Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen. Berlin: Beuth 07/2014.

DIN EN ISO 6892-1

DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth 12/2009.

DIN EN ISO 14273

DIN EN ISO 14273: Probenmaße und Verfahren für die Scherzugprüfung an Widerstandspunkt-, Rollnaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln. Berlin: Beuth 03/2002.

ENGLER ET AL. 2011

Engler, S.; Ramsayer, R.; Poprawe, R.: Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and Infrared Lasers. In: Schmidt, M. et al. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2011 (LiM). München, 23.-26.05.2011. Amsterdam: Elsevier, 2011, S. 339-346.

FLUKE 2012

Fluke: Fluke 8845A Digital Multimeters. Datenblatt. Everett Washington, 2012, S. 2.

GEDICKE 2011

Gedicke, J.: Robuste Prozessführung beim Laserstrahl-Mikroschweißen mit hochbrillanten Strahlquellen: Dissertation. RWTH Aachen, 2011. Aachen: Shaker. ISBN: 978-3-8440-0133-4.

HABENICHT 2009

Habenicht, G.: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6. Auflage. Berlin: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-85264-3.

HAWRANEK 2014

Hawranek, D.: Ständig unter Strom. Der Spiegel 67 (2014) 38, S. 80-81.

HEIDER ET AL. 2011

Heider, A.; Stritt, P.; Hess, A.; Weber, R.; Graf, T.: Process Stabilization at welding Copper by Laser Power Modulation. In: Schmidt, M. et al. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2011 (LiM). München, 23.-26.05.2011. Amsterdam: Elsevier, 2011, S. 81-78.

HEIDER ET AL. 2012

Heider, A.; Weber, R.; Graf, T.: Spatter Minimized Copper Welding through Active Process Guiding. In: Graf, T. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Stuttgart Laser Technology Forum '12. Stuttgart, 13.-14.06.2012.

HENNIGE ET AL. 2013

Hennige, V.; Wiedemann, U.; Stütz, H.; Niederl, D.: Safe and Affordable Series Batteries. In: Haus der Technik (Hrsg.): 5. Fachtagung Kraftwerk Batterie. Aachen, 26.-27.02.2013.

HERRMANN 2011

Herrmann, D.: Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoffen. Herausforderungen, Festigkeitseigenschaften, Gefügeentwicklung. In: SLV (Hrsg.): DKI-Seminar Fügen von Kupferwerkstoffen. Duisburg, 12.-13.04.2011.

HESS ET AL. 2010A

Hess, A.; Heider, A.; Schuster R.; Weber, R.; Graf, T.: Benefits from Combining Laser Beams with Different Wavelength (Green and IR) for Copper Welding. In: LIA (Hrsg.): Proceedings of the 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Anaheim, California, 26.-30.09.2010. Orlando: LIA pub., 2010, S. 540-546.

HESS ET AL. 2010B

Hess, A.; Weber, R.; Heider, A.; Graf, T.: Forced deep-penetration welding with low-power second-harmonic assistance of cw copper welding with 1 μm wavelength. In: Schmidt, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 6th LANE. Erlangen, 21.-24.09.2010. Amsterdam: Elsevier (2010), S. 29-36.

HESS 2012

Hess, A.: Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit: Dissertation. Technische Universität Stuttgart, 2012. München: Utz. ISBN: 978-3-8316-4198-7. (Laser in der Materialbearbeitung).

HESSE 2011

Hesse, W.: Aluminium-Werkstoff-Datenblätter. 6. Auflage. Berlin: Beuth, 2011. ISBN: 978-3-410-22047-3.

HOFMANN ET AL. 2013

Hofmann, H.; Spindler, J.; Fischer, H.: Werkstoffe in der Elektrotechnik. Grundlagen - Struktur - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung - Technologie. 7. Auflage. München: Hanser, 2013. ISBN: 9783446437487.

HOLLAND 1975

Holland, J. H.: Adaptation in Natural and Artificial Systems. An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. ISBN: 0472084607.

HOLM 1941

Holm, R.: Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Berlin: Springer, 1941. ISBN: 3662422220. (Technische Physik in Einzeldarstellungen 4).

HRACH & CIFRAIN 2011

Hrach, D.; Cifrain, M.: Batterietechnik und -management im Elektrofahrzeug. In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 128 (2011) 1-2, S. 16-21.

HUEGEL & GRAF 2007

Hügel, H.; Graf, T.: Laser in der Fertigung. Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. 2. Auflage. Wiesbaden: Teubner, 2007. ISBN: 978-3-8351-0005-3.

ISO/DIS 6469-1

International Organization for Standardization ISO/DIS 6469-1: Electric road vehicles - Safety specifications. Geneva: ISO Copyright Office 09/2009.

ISO 7500-1

ISO 7500-1: Metallic materials - Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system. Geneva: ISO Copyright Office 08/2004.

JONES 1982

Jones, M. G.: Laser Lead Welding. In: LIA (Hrsg.): Proceedings of the inspection, measurement and control symposium (ICALEO). Boston, Massachusetts, 20.-23.09.1982. Toledo, Ohio: The Institute, 1982, S. 87-100.

JOSSEN & WEYDANZ 2006

Jossen, A.; Weydanz, W.: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. Untermeitingen: Reichardt, 2006. ISBN: 978-3939359111.

KIM ET AL. 2011

Kim, T. H.; Yum, J.; Hu, S. J.; Spicer, J. P.; Abell, J. A.: Process robustness of single lap ultrasonic welding of thin, dissimilar materials. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (2011) 1, S. 17-20.

KLASSEN ET AL. 1999

Klassen, M.; Schubert, E.; Skupin, J.: Grundlegende Untersuchungen zur Steigerung der Prozesssicherheit beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt: Abschlussbericht. BMBF-Programm Luftfahrtforschung und -technologie 1995 – 1998. Bremen: BIAS-Verlag, 1999.

KLEIN 2012

Klein, B.: FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 9. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012. ISBN: 978-3-8348-2134-8.

KORTHAUER 2013

Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin: Springer, 2013. ISBN: 978-3-642-30652-5.

KRAETZSCH ET AL. 2011

Kraetzsch, M.; Standfuss, J.; Klotzbach, A.; Kaspar, J.; Brenner, B.; Bayer, E.: Laser Beam Welding with High-frequency Beam Oscillation: Welding of Dissimilar Materials with Brilliant Fiber Lasers. In: LIA (Hrsg.): Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando, Florida, 23.-27.10.2011. Orlando: LIA pub., 2011, S. 169-178.

KRAMER 2009

Kramer, O.: Computational Intelligence. Eine Einführung. Dordrecht, New York: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-79738-8.

KRONTHALER ET AL. 2011

Kronthaler, M. R.; Braunreuther, S.; Zaeh, M. F.: Bifocal Hybrid Laser Welding -More than a Superposition of two Processes. In: Schmidt, M. et al. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2011 (LiM). München, 23.-26.05.2011. Amsterdam: Elsevier, 2011, S. 208-214.

KRUSE ET AL. 2011

Kruse, R.; Borgelt, C.; Klawonn, F.; Moewes, C.; Ruß, G.; Steinbrecher, Matthias: Computational Intelligence. Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011. ISBN: 978-3-8348-1275-9.

KUEPFMUELLER ET AL. 2013

Küpfmüller, K.; Mathis, W.; Reibiger, A.: Theoretische Elektrotechnik. Eine Einführung. 19. Auflage. Berlin: Springer, 2013. ISBN: 978-3-642-37939-0.

KURFER 2013

Kurfer, J.: Funktionsweise und Aufbau von Lithium-Ionen-Zellen. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): Batterieproduktion - Vom Rohstoff bis zum Hochvolt-speicher. München: Utz, 2013, S. 23-36. ISBN: 978-3-8316-4249-6. (Seminarberichte *iwb*).

LANGE ET AL. 1993

Lange, K.; Müller, H.; Zeller, R.; Herlan, T.; Schmidt, V.: Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 4: Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion. 2. Auflage. Berlin: Springer, 1993. ISBN: 978-3-642-63451-2.

LEE ET AL. 2003

Lee, J. H.; Lee, H. M.; Ahn, S.: Battery dimensional changes occurring during charge/discharge cycles - thin rectangular lithium ion and polymer cells. In: Journal of Power Sources 119-121 (2003), S. 833-837.

LEE ET AL. 2010

Lee, S.; Kim, T.; Hu S.: Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing. In: Roth et al. (Hrsg.): Proceedings of the International Manufacturing Science and Engineering Conference (ASME 2010). Erie, Pennsylvania, 12.-15.10.2010, S. 1-9.

MEHLMANN ET AL. 2013

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: Japan Laser Processing Society (JLPS) (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (Lamp 2013). Niigata, Japan, 23.-26.07.2013. Osaka, Japan: JLPS, 2013.

MEIER 2006

Meier, O.: Hochfrequentes Strahlpendeln zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen. In: Haverkamp, H. (Hrsg.): Final Report AIF-Vorhaben 13600N, 01.03.2004-31.05.2006. Hannover: Laserzentrum Hannover e.V., 2006.

MYS & SCHMIDT 2004

Mys, I.; Schmidt, M.: Laser micro welding of dissimilar Cu-Al Materials for electronic contacts. In: Geiger, M. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE 2004). Erlangen, 21.-24.09.2004. Bamberg: Meisenbach Verlag 2004, S. 623-631.

NIEMANN ET AL. 2005

Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 4. Auflage. Berlin: Springer, 2005. ISBN: 3-540-25125-1. (Maschinenelemente 1).

OEFELE 2012

Oefele, F.: Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen: Dissertation. Technische Universität München, 2012. München: Utz. ISBN: 978-3-8316-4224-3. (*iwb*-Forschungsberichte Band 267).

PARTHIER 2010

Parthier, R.: Messtechnik. Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure. 5. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. ISBN: 978-3834808110.

PAULESER & SCHMIDT 2014

Pauleser, T.; Schmidt, P.: Optimization of Laser Weld Seam Configurations of Electric Contacts within High-Voltage Batteries. In: Automotive Circle International (Hrsg.): European Automotive Laser Applications (EALA) - 15th European Expert Conference. Bad Nauheim, 11.-12.02.2014. Hannover: Vincentz Network GmbH, 2014.

PLAPPER ET AL. 2013

Plapper, P.; Solchenbach, T.; Cai, W.: Laser Beam Joining of Li-Ion Battery Modul Assembly. In: Automotive Circle International (Hrsg.): European Automotive Laser Applications (EALA) - 14th European Expert Conference. Bad Nauheim, 19.-20.02.2013. Hannover: Vincentz Network GmbH, 2013, S. 45-69.

PLASSMANN & SCHULZ 2009

Plassmann, W.; Schulz, D.: Handbuch Elektrotechnik. Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker. 5. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009. ISBN: 978-3834804709.

POHLHEIM 1999

Pohlheim, H.: Evolutionäre Algorithmen. Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis. Berlin: Springer, 1999. ISBN: 3-540-66413-0.

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: Springer, 2005. ISBN: 3540214062.

PRASSEK 1996

Prassek, A.: Dynamische Energiebilanzierung verschiedener Traktionsbatteriesysteme: Dissertation. Technische Universität München, 1996. Herrsching: Energie & Management-Verlag. (IfE-Schriftenreihe 29).

RAPP 1996

Rapp, J.: Laserschweißbeignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau: Dissertation. Technische Universität Stuttgart, 1996. Stuttgart: Teubner. ISBN: 978-3519062264. (Laser in der Materialbearbeitung).

RAVDEL ET AL. 2003

Ravdel, B.; Abraham, K.; Gitzendanner, R.; DiCarlo, J.; Lucht, B.; Campion, C.: Thermal stability of lithium-ion battery electrolytes. *Journal of Power Sources* 119-121 (2003) o. Nr., S. 805-810.

RAYNE ET AL. 1980

Rayne, J.; Shearer, M.; Bauer, C.: Investigation of Interfacial Reactions in Thin Film Couples of Aluminum and Copper by Measurement of Low Temperature Contact Resistance. In: *Thin Solid Films* 65 (1980) 3, S. 381-391.

REDDY & LINDEN 2011

Reddy, T. B.; Linden, D.: *Linden's Handbook of Batteries*. 4. Auflage. New York, New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN: 978-0071624213.

SALOMON 1998

Salomon, R.: Evolutionary algorithms and gradient search: similarities and differences. In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2 (1998) 2, S. 45-55.

SCHEDEWY ET AL. 2011

Schedewy, R.; Bayer, E.; Brenner, B.; Standfuß, J.: Prospects of Welding Foils with Solid State Laser for Lithium-ion Batteries. In: LIA (Hrsg.): *Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)*. Orlando, Florida, 23.-27.10.2011. Orlando: LIA pub., 2011, S. 817-824.

SCHINZEL 2002

Schinzel, C. M.: Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau: Dissertation. Technische Universität Stuttgart, 2002. München: Utz. ISBN: 3-8316-0201-8. (Laser in der Materialbearbeitung).

SCHLEGEL 2011

Schlegel, S.: Langzeitverhalten von Schraubverbindungen mit Stromschiennen aus Reinkupfer in der Elektrotechnik unter besonderer Berücksichtigung der Temperatur: Dissertation. Technische Universität Dresden, 2011. Dresden: Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik.

SCHMIDT & WEIGL 2010

Schmidt, M.; Weigl, M.: Laser-Bonding in High Power Electronics. In: Journal of Laser Micro/Nanoengineering 5 (2010) 3, S. 242-247.

SCHMIDT ET AL. 2012

Schmidt, P.; Schweier, M.; Zaeh, M. F.: Joining of Lithium-Ion Batteries Using Laser Beam Welding: Electrical Losses of Aluminum and Copper Joints. In: LIA (Hrsg.): Proceedings of the 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Anaheim, California, 23.-27.09.2012. Orlando: LIA pub., 2012, S. 915-923.

SCHMIDT ET AL. 2013A

Schmidt, P.; Pauleser, T.; Zaeh, M. F.: eProduction of automotive battery systems at AUDI AG. In: International Quality & Production Center (IQPC) (Hrsg.): Smart EV and HEV Battery Production. Darmstadt, 22.-24.04.2013. Berlin: IQPC, 2013.

SCHMIDT ET AL. 2013B

Schmidt, P.; Belitzki, A.; Fuchs, A.: Funktionsweise eines Hochvoltspeichers. 2. Auflage. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): Batterieproduktion - Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher. München: Utz, 2013, S. 11-36. ISBN: 978-3-8316-4249-6. (Seminarberichte *iwb* 107).

SCHMIDT ET AL. 2014

Schmidt, P.; Pauleser, T.; Zaeh, M. F.: Optimisation of Weld Seam Configurations Using a Genetic Algorithm. In: Bauer, W. et al. (Hrsg.): 8th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET 2014). Stuttgart, 25.-28.03.2014. Stuttgart: IRB Mediendienstleistungen 2014. ISBN: 978-3-8396-0697-1.

SCHNEIDER ET AL. 2009

Schneider, R.; Löbl, H.; St. Großmann; Schoenemann, T.; Hoidis, M.: Langzeitverhalten von Aluminium-Kupfer-Verbindungen in der Elektroenergie-technik. In: Metall 63 (2009) 11, S. 591-594.

SCHOFT ET AL. 2001

Schoft, S.; Löbl, H.; Kindersberger, J.: Abbau der Verbindungskraft in Aluminium-Hochstromverbindungen durch Kriechen des Leitermaterials. In: Elektrische 10-12 (2001) 55, S. 470-477.

SCHRUEFER 1990

Schrüfer, E.: Elektrische Messtechnik. München: Hanser, 1990. ISBN: 3-446-16102-3. (Studienbücher der technischen Wissenschaft).

SCHULZE 2010

Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens. Eisenwerkstoffe- Nicht-eisenmetallische Werkstoffe. 4. Auflage. Berlin: Springer, 2010. ISBN: 978-3-642-03183-0.

SCHWEIER ET AL. 2011

Schweier, M.; Zaeh, M. F.; Reppich, J.; Hatwig, J.: Single Mode Fiber Laser Beam Welding with Superposed Beam Oscillation. In: LIA (Hrsg.): Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Orlando, Florida, 23.-27.10.2011. Orlando: LIA pub., 2011, S. 536-546.

SIVANANDAM & DEEPA 2008

Sivanandam, S. N.; Deepa, S. N.: Introduction to Genetic Algorithms. Berlin: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-73189-4.

SMITH ET AL. 2013

Smith, S.; Blackburn, J.; Gittos, M.; Bono, P. de; Hilton, P.: Welding of Dissimilar Metallic Materials Using a Scanned Laser Beam. In: LIA (Hrsg.): Proceedings of the 32nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Miami, Florida, 06-10.10.2013. Orlando: LIA pub., 2013, S. 493-502.

SOLCHENBACH 2014

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

SOLCHENBACH & PLAPPER 2013A

Solchenbach, T.; Plapper, P.: Combined Laser Beam Braze-Welding Process for Fluxless Al-Cu Connections. In: Shutte, C. et al. (Hrsg.): International Conference on Competitive Manufacturing (COMA13). Stellenbosch, Südafrika, 30.01.-01.02-2013, S. 131-136.

SOLCHENBACH & PLAPPER 2013B

Solchenbach, T.; Plapper, P.: Mechanical characteristics of laser brazed aluminium-copper connections. In: Optics & Laser Technology 54 (2013), S. 249-256.

SOLCHENBACH ET AL. 2014

Solchenbach, T.; Plapper, P.; Cai, W.: Electrical performance of laser braze-welded aluminum–copper interconnects. In: *Journal of Manufacturing Processes* 16 (2014) 2, S. 183-189.

STANDFUSS ET AL. 2010

Standfuss, J.; Schedewy, R.; Heitmanek, M.: Laser Welding of Lithium-ion Batteries for the Automotive Industry. Beyer et al. (Hrsg.): *International Laser Symposium Fiber & Disk (FiSC)*. Dresden, 05.-06.10.2010.

STEIGER 2014

Steiger, W.: Future Mobility. Volkswagen Group's Solutions for Sustainable Mobility. In: Brandon, N.& Wellers, M. (Hrsg.): *Barclays Future Powertrain Symposium (FPC2014)*. London: 24.07.2014.

TAHERI ET AL. 2011

Taheri, P.; Hsieh, S.; Bahrami, M.: Investigating electrical contact resistance losses in lithium-ion battery assemblies for hybrid and electric vehicles. In: *Journal of Power Sources* 196 (2011) 15, S. 6525-6533.

THOMY ET AL. 2006

Thomy, C.; Seefeld, T.; Wagner, F.; Vollertsen, F.: Humping in Welding with Single-Mode Fiber Lasers. In: LIA (Hrsg.): *Proceedings of the 25th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO)*. Scottsdale, Arizona, 30.-02.11.2006. Orlando: LIA pub., 2006, S. 543-551.

TUEBKE 2010

Tübke, J.: Elektrische Energiespeicher für die Elektromobilität. In: Tropschuh, P. (Hrsg.): *Vortragsreihe der AutoUni*. Ingolstadt: 18.10.2010.

VDI-RICHTLINIE 3258 A

Verein Deutscher Ingenieure; Verband Deutscher Elektrotechniker: *Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen - VDI-Richtlinien 3258 B1*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1964.

VETTER ET AL. 2005

Vetter, J.; Novák, P.; Wagner, M.; Veit, C.; Möller, K.-C.; Besenhard, J.O.; Winter, M.; Wohlfahrt-Mehrens, M.; Vogler, C.; Hammouche, A.: Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 147 (2005) 1-2, S. 269-281.

VINARICKY 2002

Vinaricky, E.: *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*. 2. Auflage. Heidelberg: Springer, 2002. ISBN: 3-540-42431-8.

WEBERPALS 2010

Weberpals, J.-P.: Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen: Dissertation. Technische Universität Stuttgart, 2010. München: Utz. ISBN: 978-3-8316-0995-6. (Laser in der Materialbearbeitung).

WEIGL ET AL. 2010A

Weigl, M.; Grimm, A.; Frick, T.; Schmidt, M.: Laser Welding of Dissimilar Copper-Aluminum Connections by Means of Roll-Cladded Inserts. In: LIA (Hrsg.): Proceedings of the 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO). Anaheim, California, 26.-30.09.2010. Orlando: LIA pub., 2010, S. 554-561.

WEIGL ET AL. 2010B

Weigl, M.; Albert, F.; Schmidt, M.: Laserstrahl-Mikroschweißen artungleicher Metalle. In: Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS) (Hrsg.): Jahrbuch Mikroverbindungstechnik 2010/2011. Düsseldorf: DVS-Verlag, 2010, S. 13-31. ISBN: 978-3-87155-279-3.

WEIGL ET AL. 2011A

Weigl, M.; Albert, F.; Schmidt, M.: Enhancing the Ductility of Laser-Welded Copper-Aluminum Connections by using Adapted Filler Materials. In: Schmidt, M. et al. (Hrsg.): Lasers in Manufacturing 2011 (LiM). München, 23.-26.05.2011. Amsterdam: Elsevier, 2011, S. 332-338.

WEIGL ET AL. 2011B

Weigl, M.; Grimm, A.; Schmidt, M.: Laser-welded Connections for High-Power Electronics in Mobile Systems. In: Franke, J. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1st International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, 28.-29.09.2011. Picataway, New Jersey: IEEE, 2011, S. 88-92. ISBN: 978-1-4577-1371-2.

WESTKAEMPER & WARNECKE 2010

Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: Einführung in die Fertigungstechnik. 8. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. ISBN: 9783834897985.

10 Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren von 2012 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen wurden Fragestellungen zur elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batterien mittels Laserstrahlschweißen untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

| Studierender | Studienarbeit |
|---------------------|---|
| Trautmann, Martin | Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung von Übergangswiderständen bei der Zellkontaktierung (Audi AG; Abgabe: August 2012) |
| Pfaff, Jochen | Messung des elektrischen Übergangswiderstands laserstrahlgeschweißter Kontakte (<i>iwb</i> -Nr.: 2012/047; Abgabe: September 2012) |
| Berghofer, Benedikt | Untersuchung der elektrischen und thermischen Eigenschaften laserstrahlgeschweißter Kontakte mittels der Finite-Elemente-Methode (<i>iwb</i> -Nr.: 2012/055; Abgabe: Oktober 2012) |
| Nitschké, Bernhard | Elektrische Optimierung einer Schweißnahtgeometrie mittels genetischer Algorithmen (<i>iwb</i> -Nr.: 2013/029; Abgabe: Juli 2013) |
| Frisch, Thomas | Laserstrahlschweißen von Aluminium und Kupfer bei der Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batterien (<i>iwb</i> -Nr.: 2013/030; Abgabe: Juli 2013) |
| Buchmann, Erhard | Untersuchung von Schweißnahtgeometrien hinsichtlich mechanischer Eigenschaften mittels der Finite-Elemente-Methode (<i>iwb</i> -Nr.: 2013/070; Abgabe: Dezember 2013) |

| | |
|-----------------|---|
| Zöltsch, Martin | Multikriterielle Optimierung von Schweißnähten zur Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batterien mittels eines genetischen Algorithmus (<i>iwb</i> -Nr.: 2014/008; Abgabe: Juli 2014) |
| Bollmann, Peter | Laserstrahl-Schweißstrategien zur elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Batterien (<i>iwb</i> -Nr.: 2014/032; Abgabe: September 2014) |

11 Anhang

A1 Fertigungsparameter der Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen

Tabelle 11-1: Übersicht der Fertigungsparameter zur Herstellung der Aluminium-Kupfer-Mischverbindungen

| |
|---|
| Laserstrahlschweißen, iwb TUM |
| $P_L = 1350 \text{ W}$, $v_L = 2 \text{ m/min}$, $f = 200 \text{ Hz}$, $r_{osz} = 0,25 \text{ mm}$ |
| Kaltgasspritzen, NHK Spring Co. Ltd |
| Prozessgas: N_2 / He , Pulvertemperatur ca. $900 \text{ }^\circ\text{C}$, Geschwindigkeit des Pulvers ca. 2000 m/s , |
| Dovetail-Walzplattieren, Materion Technical Materials Co. Ltd. |
| keine Fertigungsparameter verfügbar |
| Elektromagnetische Pulstechnologie, PSTproducts GmbH |
| Pulsenergie beim Vorformen einer Sicke (Tiefe $1,5 \text{ mm}$): 2 kJ , Schweißenergie: 6 kJ |
| Ultraschallschweißen, ISF RWTH |
| Schunk LSC: Schweißenergie: $2,2 \text{ kJ}$, Amplitude: $21 \text{ }\mu\text{m}$, Fügedruck im Druckzylinder: $3,4 \text{ bar}$ ($2,5 \text{ kN}$) |
| Leitkleben, Fraunhofer IFAM |
| temperaturhärtender Einkomponenten-Epoxidharz-Klebstoff, Füllmaterial: Silber, Anteil des Füllstoffs: 83% , Aushärtetemperatur: $180 \text{ }^\circ\text{C}$, Haltezeit: 5 min |
| Walzplattieren, Heraeus Holding GmbH |
| keine Fertigungsparameter verfügbar |

A2 Kenngrößen der gepulsten Strahlquelle

Tabelle 11-2: Kenngrößen der gepulsten Strahlquelle

| | |
|--|-------------------|
| Strahlquelle | |
| <i>Nd:YAG-Pulslaser ML-2650B (Miyachi Europe GmbH)</i> | |
| Mittlere Laserleistung P_L | 600 W |
| Max. Pulsleistung $P_{LP,max}$ | 10.000 W |
| Pulsrate PPS | 1 - 500 1/s |
| Wellenlänge λ_{Nd} | 1070 nm |
| Kerndurchmesser des Lichtwellenleiters d_{LWL} | 600 μm |
| Festoptik | |
| <i>FOC-L50-120120 (Miyachi Europe GmbH)</i> | |
| Brennweite f_f | 120 mm |
| Arbeitsabstand | 113 mm |
| Lasersystem | |
| Rayleighlänge z_R | 0,55 mm |
| Fokusbereich d_f | 600 μm |
| Strahlparameterprodukt SPP | - |

A3 Batteriemodul mit geschraubter Kontaktierung

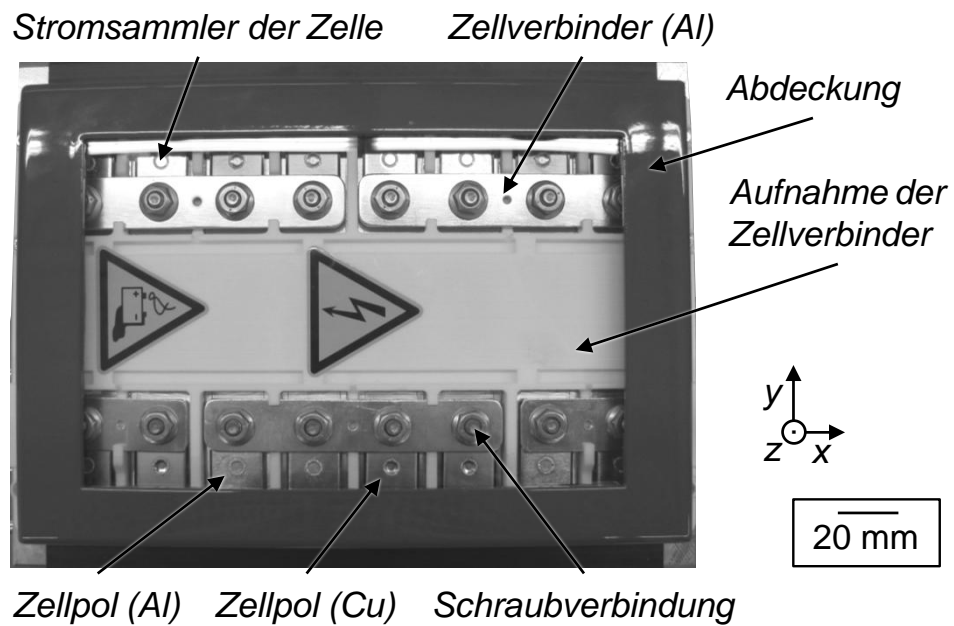


Abbildung 11-1: Batteriemodul mit geschraubter elektrischer Kontaktierung zwischen Zellverbinder und Zellpol

A4 Daten zur wirtschaftlichen Bewertung

Tabelle 11-3: Angenommene Werte zur Berechnung der Anschaffungskosten des Laserbearbeitungszentrums

| Investitionskosten des Laserbearbeitungszentrums | | |
|---|------|---------|
| 3-kW-Faserlaser | in € | 240.000 |
| Scanneroptik | in € | 70.000 |
| Kühler des Lasers | in € | 60.000 |
| Laserzelle | in € | 180.000 |

Tabelle 11-4: Angenommene Werte zur Berechnung der Fertigungskosten

| Fertigungskosten | | | |
|---|-----------------------------|----------------------|---------------------------------|
| | | Schraubanlage | Laserbearbeitungszentrum |
| Anschaffungskosten | in € | 15.000 | 550.000 |
| Nutzungsdauer | in Jahren | 5 | 5 |
| Arbeitsstunden | in h/Jahr | 3.351 | 3.351 |
| Anlagenverfügbarkeit | in % | 90 | 90 |
| Abschreibungs- kosten | in €/h | 0,99 | 36,47 |
| Zinssatz pro Jahr | in % | 1,75 | 1,75 |
| Kalkulierte Zinskosten | in €/h | 0,04 | 1,6 |
| Platzbedarf | in m ² | 5 | 12 |
| Betriebskostensatz | in €/m ² | 550 | 550 |
| Raumkosten | in €/h | 0,82 | 2,46 |
| Nominelle Leistung | in kW | < 1 | 22 |
| Standardnutzungs- faktor | in % | 38 | 40 |
| Strompreis | in €/kWh | 0,068 | 0,068 |
| Energiekosten | in €/h | 0,01 | 0,60 |
| Instandhaltungs- kostensatz | in % | 7 | 7 |
| Instandhaltungskosten | in €/h | 0,07 | 2,55 |
| Maschinen- stundensatz | in €/h | 2,56 | 43,68 |
| Lohnkosten | in €/h | 74,40 | 74,40 |
| Arbeitsstundensatz | in €/h | 2,61 | 118,08 |
| Fertigungszeit pro Batteriemodul | in s | 80 | 20 |
| Bauteilwechselzeit pro Takt | in s | 30 | 30 |
| Gesamttaktzeit | in s | 110 | 50 |
| Fügekosten pro Bat- teriemodul | in €/Stück | 2,59 | 1,82 |