Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-21

Kontaktierung temperaturempfindlicher Elektrodenstapel für zukunftsweisende Zelltechnologien

Laserstrahlschweißen in der Batteriezellproduktion

S. Grabmann, F. Harst, L. Mayr, M. Zäh

Das Laserstrahlschweißen von Elektrodenstapeln für die interne Kontaktierung von Batteriezellen ist herausfordernd. Die geringe Dicke der Stromkollektorfolien und die hohe Wärmeausdehnung von Aluminium führen während des Prozesses zum Aufwölben und Ablösen der Folien. Der Einsatz von Nanosekunden-Laserpulsen ermöglicht das wärmearme Fügen von Aluminiumfolien mit dem Ableiter-Tab. Durch sequenzielles Schweißen einzelner Nahtabschnitte wurde das Aufwölben der Folien reduziert und es wurden homogenere Nahteigenschaften erzielt.

STICHWÖRTER

Batteriefertigung, Lasertechnik, Schweißen

Laser beam welding in battery cell production- Contacting of thermally sensitive electrode stacks for advanced cell technologies

Laser beam welding of electrode stacks for internal contacting of battery cells is challenging. The low thickness of current collector foils and the high thermal expansion of aluminum cause the foils to bulge and detach during the process. The use of nanosecond laser pulses enables to join the aluminum foils to the arrester tab with low heat input. Sequential welding of individual seam sections reduces the distortion of the foils and allows for more homogeneous seam properties.

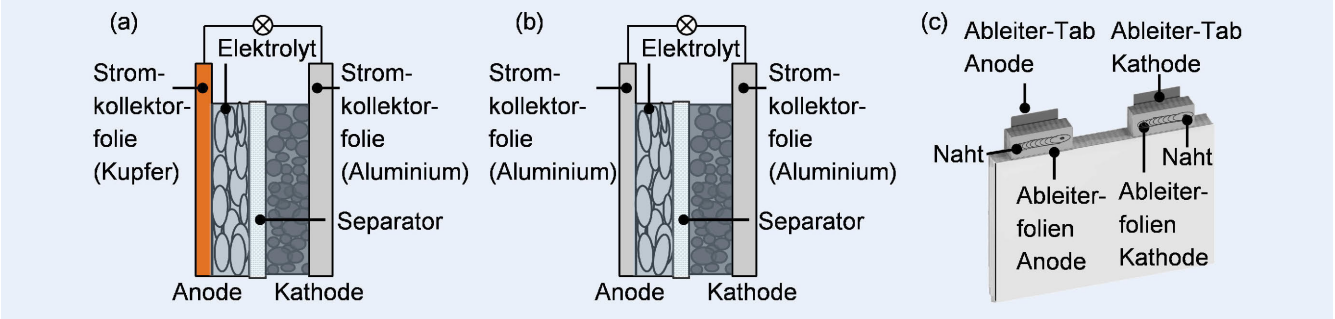

Bild 1. Schematische Darstellung der Hauptbestandteile einer Lithium-Ionen-Zelle (a) und einer Natrium-Ionen-Zelle (b); beide Zellformate sind ähnlich aufgebaut, wobei bei einer Natrium-Ionen-Zelle für beide Stromkollektoren Aluminiumwerkstoffe eingesetzt werden; eine mehrlagige Batteriezelle wird durch das Stapeln einer Vielzahl an Einzelzellen und deren elektrischer Verbindung durch Schweißnähte gebildet (c). *Grafik: TUM, iwb*

1 Entwicklungen in der Produktion von Batteriezellen

Energiespeichersystemen kommt eine entscheidende Rolle zu bei der Umstellung der Energieversorgung auf Basis von fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energien und somit zur Bekämpfung des Klimawandels. Eine Möglichkeit, Energie zu speichern, bieten elektrochemische Speicher wie etwa Lithium-Ionen-Batterien (LIB). Diese haben sich in den letzten Jahren in verschiedensten Anwendungsfeldern, etwa in der Elektromobilität oder der Konsumentenelektronik, etabliert. In **Bild 1**a ist eine Elementarzelle schematisch dargestellt, die aus zwei Elektroden, einer Anode und einer Kathode, sowie einem Separator gebildet wird und die kleinste Einheit einer Lithium-Ionen-Zelle ist.

Die gesamte Zelle ist mit einem flüssigen Elektrolyten durchtränkt. Zur Herstellung der Anode wird in der Regel Grafit zusammen mit Bindern und Additiven auf eine Stromkollektorfolie (Foliendicke: 6–10 µm) aus einer Kupferlegierung aufgebracht. Die Kathode enthält als Aktivmaterial ein Lithium-Metalloxid, das auf einem Stromkollektor aus einer Aluminiumlegierung (Foliendicke: 12–25 µm) beschichtet ist.

Aufgrund begrenzter Verfügbarkeit von Lithiumressourcen ist das Forschungsinteresse an alternativen Zellsystemen wie den Natrium-Ionen-Batterien (NIB) in den letzten Jahren gestiegen. Die hohe globale Verfügbarkeit des Elements Natrium im Vergleich zu Lithium sowie ein kostengünstiger Abbau von Natriumsalzen sind wesentliche Vorteile der Natrium-Ionen-Technologie. Trotz der genannten Unterschiede ist der prinzipielle Zellaufbau

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-21 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Tabelle 1. Bezeichnungen der Komponenten des optischen Aufbaus des Laserstrahlschweißsystems und resultierende Eigenschaften der Strahlakustik.

Komponente	
Strahlquelle	SP-200P-A-EP-Z-L-Y (SPI Lasers UK Ltd.)
2-D-Scanneroptik	SUPERSCAN IV-30-QU (RAYLASE GmbH)
f-Theta-Linse	S4LFT216 (Sill Optics GmbH & Co. KG.)

Eigenschaften der Strahlkaustik	
maximale mittlere Strahlungsleistung P_L	200 W
maximale Pulsspitzenleistung P_P	10 kW
Nenn-Wellenlänge λ	1060 nm
Beugungsmaßzahl M^2	1,3
Fokusdurchmesser d_f	31 µm
Rayleighlänge z_R	500 µm
Brennweite f	163 mm

einer NIB (Bild 1b) sehr ähnlich zu dem einer LIB, wodurch in der Zellfertigung vergleichbare Produktionsprozesse eingesetzt werden [1]. Im Unterschied zu einer LIB werden bei einer NIB als Stromkollektoren der Anode ebenfalls Aluminiumwerkstoffe genutzt, da keine Reaktion des Natriums mit der Aluminiumfolie zu erwarten ist [2]. Daher wird prognostiziert, dass die benötigte und verarbeitete Menge an Aluminium-Stromkollektorfolien in der Elektrodenproduktion deutlich ansteigen wird.

Um aus den einzelnen Bestandteilen einer Batteriezelle großformatige Pouch- oder Hard-Case-Zellen zu fertigen, werden die Anoden- und Kathodenblätter sowie der Separator gestapelt und anschließend an den unbeschichteten Abschnitten der Elektroden mittels einer Schweißnaht elektrisch verbunden. Dabei werden elektrische Verbindungen zwischen den einzelnen Stromkollektorfolien sowie mit einem Ableiter-Tab realisiert (Bild 1c). Dieser Prozessschritt wird zellinterne Kontaktierung genannt, für den in der Regel das Ultraschallschweißen als Fügeverfahren eingesetzt wird [3]. Eine vielversprechende Alternative ist das Laserstrahlschweißen.

In einer Vielzahl an Veröffentlichungen wurde das Laserstrahlschweißen zum Fügen dünner Folien im Mikrometerbereich sowohl mit als auch ohne Ableiter-Tab untersucht. Dabei wurden schwerpunktmäßig Kupferwerkstoffe betrachtet. In den meisten Studien wurde Laserstrahlung im nahinfraroten Wellenlängenbereich verwendet. Für ein akzeptables Schweißergebnis ist ein Nullspalt zwischen allen Fügepartnern sicherzustellen [4]. Die Folien im Überlappstoß mit einer geeigneten Spannvorrichtung zu fixieren, lieferte verglichen mit anderen Stoßkonfiguration die besten Ergebnisse [5]. Im direkten Vergleich zu Ultraschallschweißnähten wurden ähnliche oder bessere mechanische und elektrische Nahteigenschaften erzielt [5]. Die örtliche Modulation des Laserstrahls in Form eines Kreises oder einer Acht ermöglichte die Verbindung von bis zu 30 Kupferfolien, die jeweils eine minimale Dicke von 17 µm hatten [6]. Der Wärmeeintrag in den Nahtnebenbereich wurde durch die Verwendung einer Spike-Puls-Strategie gegenüber einer kontinuierlichen Strahlführung deutlich gesenkt. Die Versuche wurden an Folienstapeln, bestehend aus 15 Kupferfolien ohne Ableiter-Tab, durchgeführt [7].

Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei Experimenten zum Schweißen von 30 Kupferfolien im Überlappstoß mit grüner Wellenlänge ($\lambda = 515$ nm) erzielt. Dabei wurde sowohl eine Millisekunden-Pulsstrategie mit einer kontinuierlichen als auch mit einer örtlich und zeitlich oszillierenden Strahlführung verglichen [8]. Auch in dieser Studie wurde gezeigt, dass Pulsstrategien -vorteilhaft sind, um die Wärmeeinflusszone im Nahtnebenbereich zu verkleinern und daher für eine Anwendung im Umfeld der Batterieproduktion besonders geeignet sind [8]. Laserstrahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich wird im Vergleich zu infraroten Wellenlängen von Kupferwerkstoffen bei Raumtemperatur besser absorbiert [9]. Dies erleichtert das Einkoppeln der Laserstrahlung in die Fügezone und Prozessinstabilitäten wie beispielsweise die Bildung von Spritzern [10] werden reduziert. Da im Bereich der Batterieproduktion Spritzer zwingend zu vermeiden sind, wurde das Folienschweißen mit grüner und blauer Laserstrahlung verstärkt untersucht. Sowohl die Verbindung einzelner Folienlagen mit blauer Strahlung [11] als auch das Fügen von bis zu 40 Kupferfolien an einen Ableiter-Tab [12] resultierte in guten Nahteigenschaften. Vor allem die mechanischen Eigenschaften waren vielversprechend.

Der industrielle Einsatz des Laserstrahlschweißens zum Fügen von Folienstapeln wird derzeit durch eine Vielzahl an Prozessfehlern beim Schweißen der dünnen Aluminiumfolien limitiert. So können beim Schweißen Risse zwischen den Aluminiumfolien und der Schweißnaht entstehen [13]. Das Laserstrahlschweißen zeichnet sich für den Einsatz durch eine berührungslose Prozessführung sowie eine hohe Gestaltungsfreiheit bei der Zell- und Nahtauslegung aus. Vor dem Hintergrund dieser vielfältigen Vorteile für die Batterieproduktion und der steigenden Bedeutung von Stromkollektorfolien aus Aluminiumwerkstoffen ist es nötig, die bisher auftretenden Fehler zu eliminieren. Die Rissbildung im Nahtnebenbereich wurde weder durch die Verwendung von Strahloszillation [6] noch durch den Einsatz eines Singlemode-Faserlasers [14] oder grüner Laserstrahlung [12] vollständig vermieden. Das Schweißen des Folienstapels in einem Multi-Überlappstoß zwischen zwei Blechen ist eine Maßnahme, die Rissbildung zu reduzieren [15]. Das Auftreten von Poren wurde bei dieser Prozessführung nicht vollständig verhindert [15].

Ein weiterer Lösungsansatz ist die Verwendung eines gepulsten Nanosekunden-Faserlasers, wodurch die Risse im Nahtnebenbereich unterbunden wurden [16]. Jedoch zeigten die erzeugten Nähte keine homogenen Eigenschaften. Aufgrund des thermischen Verzugs während des Schweißens wurde der erforderliche Nullspalt nicht beibehalten und die Anbindungsfläche der Folien an das Ableiter-Tab in Schweißrichtung verringert.

Eine Möglichkeit, den thermischen Verzug zu reduzieren, ist die Schweißnähte segmentiert zu schweißen. Eine detaillierte Untersuchung dieses Ansatzes war bislang ausstehend und ist daher Kern der nachfolgend beschriebenen Experimente.

2 Segmentierung der Schweißnaht zur Reduktion des thermischen Verzugs

Analog zu den in [16] beschriebenen Untersuchungen wurde eine Nanosekundenpuls-Strahlquelle, welche Laserstrahlung im nahinfraroten Wellenlängenbereich emittiert, zur Reduktion der

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-21 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Heißrisse im Nahtnebenbereich beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumfolien im unteren Mikrometerbereich sowie derselbe Versuchsaufbau verwendet. Die Bezeichnungen und die Spezifikationen der Systemtechnik sowie die Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe sind in **Tabelle 1** und **Tabelle 2** aufgeführt.

Für die Versuche dieser Studie wurden entsprechend der Konfiguration in [16] je Versuchsprobe 40 Aluminiumfolien (EN AW-1050A) auf einen Ableiter-Tab (EN AW-1050) geschweißt, wie in **Bild 2**a dargestellt ist.

Der Schweißbereich wurde gemäß Bild 2b in neun Segmente unterteilt. Die Reihenfolge, in der die einzelnen Bereiche geschweißt wurden, wurde empirisch angepasst, sodass sowohl die initiale Fixierung der Folien als auch ein verteilter Wärmeeintrag die Aufwölbung des Folienstapels während des Prozesses reduzierten. Alle einzelnen Segmente wurden aus mehreren linearen, unidirektionalen Schweißnaht-Trajektorien gebildet, welche unter einem Winkel von 0°, 45° oder 90° zur x-Achse orientiert waren (Bild 2c). Innerhalb der einzelnen Segmente wurde die Schweißreihenfolge der einzelnen Trajektorien vom Zentrum nach außen gewählt, um einen Wärmestau zu vermeiden.

Die drei Trajektorien-Varianten wurden jeweils mit den drei verschiedenen Parametersätzen *P*1, *P*2 und *P*3 gemäß **Tabelle 3** gefertigt.

Die Einstellungen von *P*1 dienen als Referenz. Anhand der Leistungsstufen P_L wurden die Vorschubgeschwindigkeiten v_L und Pulsfrequenzen f_p von *P*2 und *P*3 so angepasst, dass die eingebrachte Energie pro Millimeter Nahtlänge E_S sowie die Anzahl der emittierten Pulse pro Millimeter N_p gemäß Gleichung (1) und (2) konstant sind. Somit ist die Pulsenergie ebenfalls für alle drei Parametersätze identisch.

Tabelle 2. Bezeichnungen und Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe des Folienstapels und des AbleiterTabs.

	Folien	Ableiter-Tab
Werkstoff	*EN AW-1050A (Al99,5)*	*EN AW-1050 (Al99,5)*
Hersteller	*Korff AG*	*Bikar GmbH*
Dicke	15 µm	300 µm
Anzahl	40	1

$$E_S = \frac{P_{L,P1}}{v_{L,P1}} = \frac{P_{L,P2}}{v_{L,P2}} = \frac{P_{L,P3}}{v_{L,P3}} = 8{,}25\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mm}} \quad (1)$$

$$N_p = \frac{f_{P,P1}}{v_{L,P1}} = \frac{f_{P,P2}}{v_{L,P2}} = \frac{f_{P,P3}}{v_{L,P3}} = 6{,}75 \cdot 10^3\ \frac{\mathrm{Pulse}}{\mathrm{mm}} \quad (2)$$

In Kombination mit den drei gewählten Trajektorien-Orientierungen 0°, 45° und 90° resultierten insgesamt neun Schweißkonfigurationen. Diese wurden auf die erzielten mechanischen Zugscherkräfte und die Nahtoberflächen im Schweißbereich untersucht. Die Spezifikationen der Zugscherprüfung sind in [16] dokumentiert.

Die Vermessung der Probenoberflächen wurde mit einem Lichtschnittmikroskop (VR3100, Keyence GmbH) mit 12-facher Vergrößerung durchgeführt. Die gemessenen Topografien wurden auf die jeweilige Oberfläche der obersten Folie referenziert. Zudem wurde das Bruchbild der Versuchsproben nach den Zugscherversuchen betrachtet, um Erkenntnisse zur Anbindung des Folienstapels an den Ableiter-Tab zu erhalten.

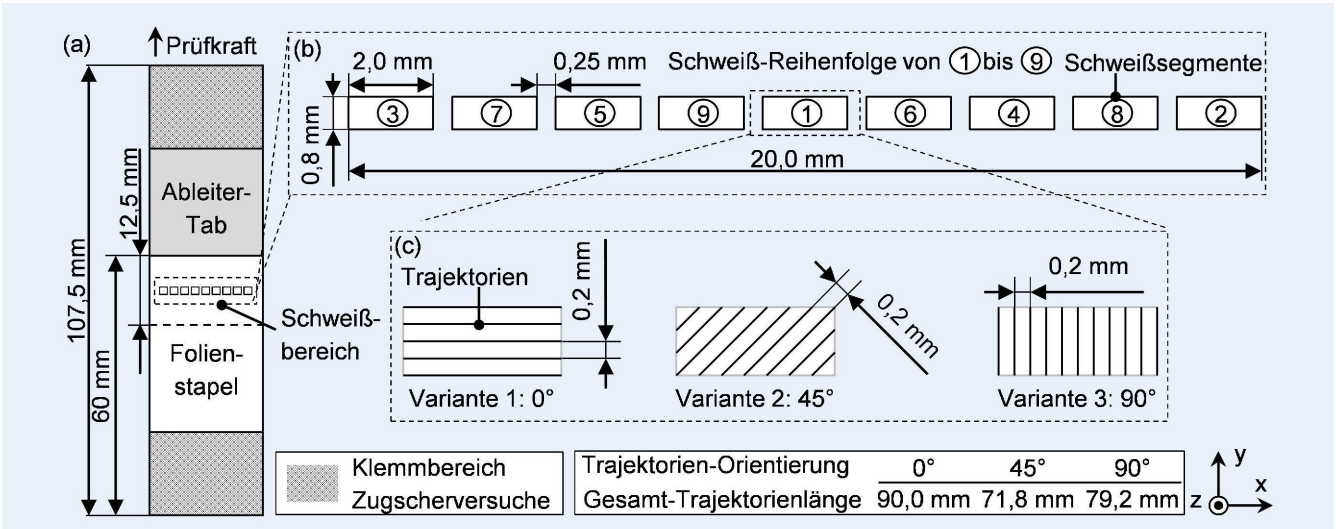

Bild 2. Nicht maßstabsgetreue Skizze der verwendeten Probengeometrien nach [16] (a); Bemaßung und Schweißreihenfolge der neun Schweißsegmente (b) und verwendete Orientierungen der Schweißnaht-Trajektorien (c). *Grafik: TUM, iwb*

Tabelle 3. Auflistung der verwendeten Schweißparametersätze; die Vorschubgeschwindigkeit und die Pulsfrequenz in P2 und P3 wurden gemäß den Gleichungen (1) und (2) zur Referenz P1 unter Vorgabe der Leistungsstufen angepasst.

Parametersatz	Laserleistung P_L in W	Vorschubgeschwindigkeit v_L in mm/s	Pulsform in -	Pulsfrequenz f_P in kHz
P1	165,0	20,00	59	135,00
P2	182,5	22,12	59	149,32
P3	200,0	24,24	59	163,64

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-21 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

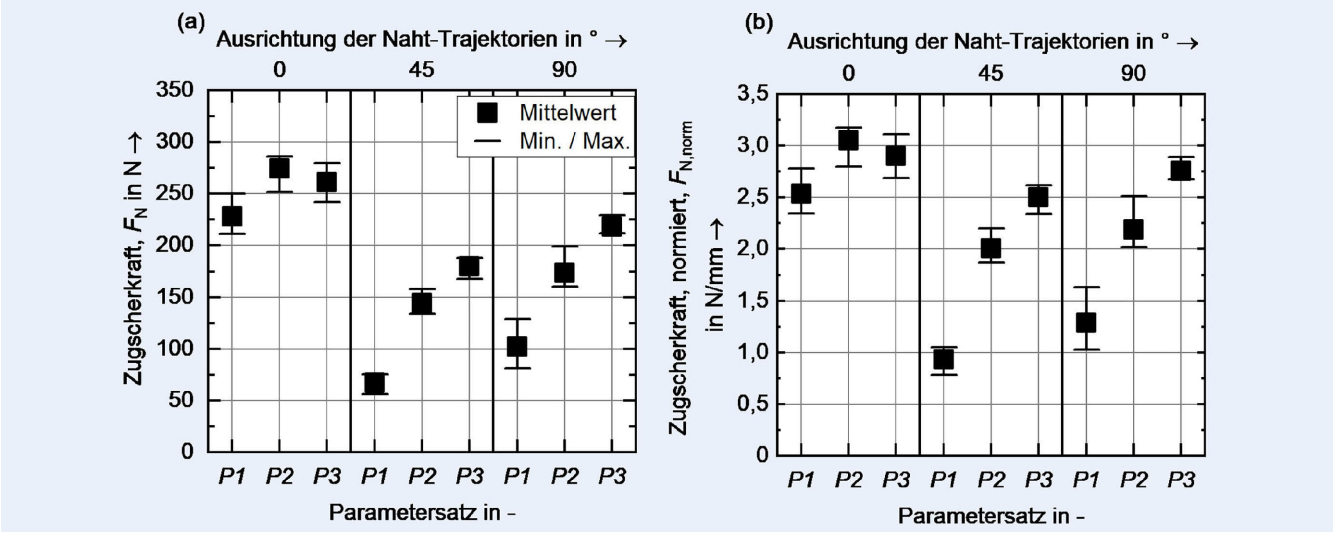

Bild 3. Absolute Zugscherkräfte (a) und auf die Gesamtlänge der geschweißten Trajektorien normierte Zugscherkräfte (b) der Versuchsreihen. *Grafik: TUM, iwb*

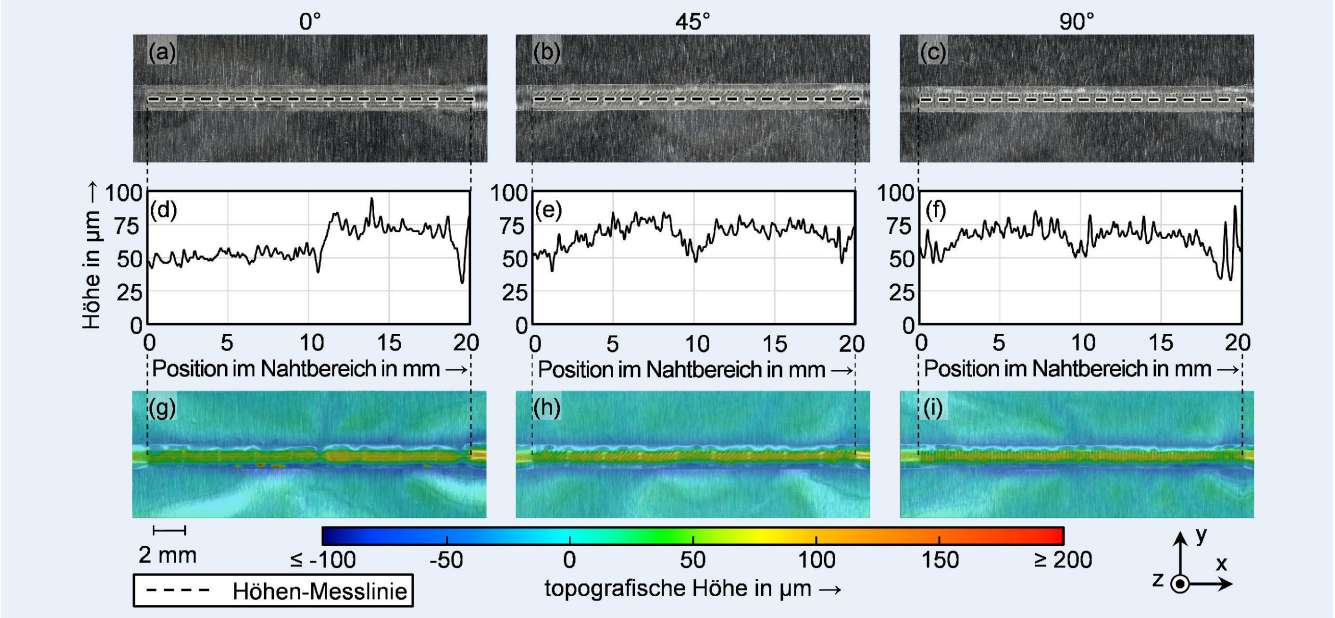

Bild 4. Aufnahmen der Nahtoberflächen (a – c), Diagramme der Höhenprofile entlang der Nahtmittellinien (d – f) und topografischer Höhenverlauf der Nahtoberflächen (g – h) für die Trajektorien-Orientierungen 0°, 45° und 90°. *Grafik: TUM, iwb*

3 Verbesserung der Nahteigenschaften durch Anpassung der Schweißstrategie

Die Ergebnisse der Zugscherversuche fasst **Bild 3** zusammen.

In Bild 3a sind die absoluten Beträge und in Bild 3b die auf die Gesamt-Trajektorienlänge (siehe Bild 2) normierten Beträge der Zugscherkräfte dargestellt. Die sowohl absolut als auch normiert höchste mittlere Zugscherkraft von 275 N beziehungsweise 3,05 N/mm wurde mit der Trajektorien-Orientierung 0° und dem Parametersatz *P*2 erreicht. Bei den Orientierungen 45° und 90° wurden mit dem Parametersatz *P*3 die höchsten mittleren Zugscherkräfte erzielt. In Bild 3 ist ersichtlich, dass bei gleichen Schweißparametern mit der Trajektorien-Orientierung 0° stets die höchste und mit der Orientierung 45° stets die geringste mittlere Zugscherkraft ermittelt wurde. Die beschriebenen Trends sind qualitativ für die Betrachtung der absoluten und der normierten Zugscherkräfte identisch.

Bild 4 stellt die Ergebnisse der Topografieanalyse der Schweißverbindungen dar. Für jede Trajektorien-Orientierung wurde eine Schweißverbindung betrachtet. Als Schweißparameter wurden die jeweiligen Parametersätze gewählt, mit denen in den Zugscherversuchen die höchsten Zugscherkräfte erreicht wurden (siehe Bild 3). Zu jeder Trajektorien-Orientierung ist eine Mikroskop-Aufnahme der Naht (Bild 4a–c), ein Diagramm des Höhenprofils über die Mittellinie der Schweißverbindung (Bild 4d–f) und ein topografisches Höhenprofil der Naht (Bild 4g–i) dargestellt.

In Bild4 d–f sind gleichmäßige Höhenprofile entlang der x-Richtung der Schweißverbindungen erkennbar. Die mit 64 µm größte Differenz zwischen dem höchstem und dem tiefsten Mess-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-21 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

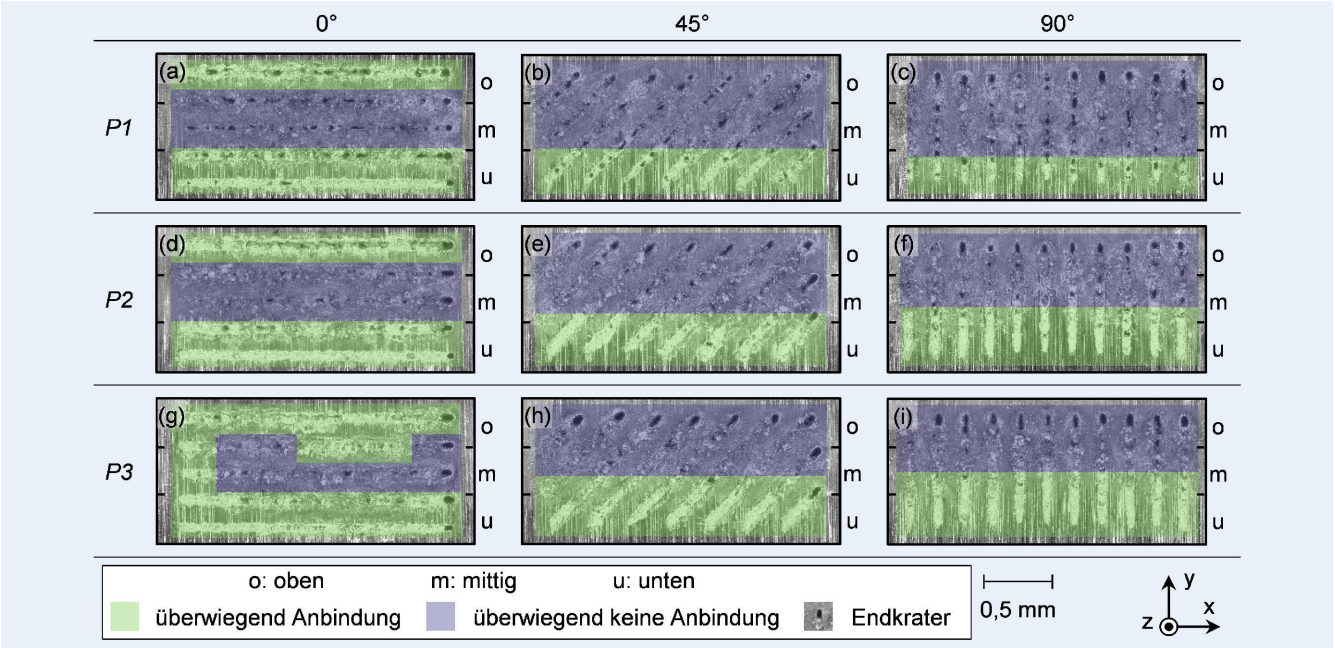

Bild 5. Aufnahmen der Kontaktbereiche der Ableiter-Tabs zu den Folienstapeln am Beispiel der Schweißsegmente 1 nach den Zugscherversuchen; Bereiche mit überwiegender Anbindung sind grün und Bereiche mit überwiegend keiner Anbindung blau markiert. *Grafik: TUM, iwb*

punkt wurde im Höhenprofil der Trajektorien-Orientierung 0° (Bild 4d) festgestellt. Außerdem wurde ermittelt, dass bei dieser Naht die durchschnittliche Höhe der zweiten Hälfte um 17,5 µm größer war als die der ersten Hälfte. Diese Differenz entspricht in etwa der Dicke einer einzelnen Folie und wurde somit als vernachlässigbar bewertet. Bei den Orientierungen 45° und 90° war der maximale Höhenunterschied mit 44 µm beziehungsweise 56 µm geringer und in x-Richtung ist kein ansteigender oder abfallender Trend erkennbar (Bild 4e, f).

Auch in den topografischen Höhenverläufen in Bild 4g–i sind bei allen Orientierungen geringe Höhenunterschiede entlang der x-Achse sichtbar. Die Segmentierung und das strategische Wählen der Schweißreihenfolge verbesserte die Homogenität der Schweißverbindungen entlang der x-Richtung im Vergleich zu [16]. Entlang der y-Achse lagen die Bereiche der Schweißnähte (Bild 4g–i) hingegen höher als die umliegenden Bereiche, was wie in [16] als ein Aufwölben des Folienstapels in diese Richtung interpretiert wurde.

In **Bild 5** ist zu jeder Kombination aus den drei Trajektorien-Orientierungen und den drei Schweißparametern eine Aufnahme der Oberfläche der Ableiter-Tabs nach dem Versagen dargestellt. Die Bilder zeigen die Kontaktfläche zum Folienstapel des Nahtsegments 1 (siehe Bild 2). Alle Proben versagten in den Zugscherversuchen durch ein Abscheren des Folienstapels vom Ableiter-Tab. Die Oberflächen der Ableiter-Tabs wurden in zwei Kategorien eingeteilt. Die erste Kategorie weist ein helles, glattes Erscheinungsbild auf und ist grün gekennzeichnet. In diesen Bereichen wurde überwiegend eine Anbindung zwischen den Folienstapeln und den Ableiter-Tabs erreicht.

Die zweite Kategorie ist durch eine dunkle, raue Oberfläche gekennzeichnet und blau markiert. In diesen Bereichen lag bereits vor den Zugscherversuchen überwiegend keine Anbindung zwischen den Folienstapeln und den Ableiter-Tabs vor. Die dunkle, raue Oberfläche resultierte aus der Verbrennung und der Oxidation des Werkstoffes. Diese Beobachtungen wurden unter anderem auf einen nicht vorhandenen Nullspalt zwischen dem Folienstapel und dem Ableiter-Tab beim Schweißen zurückgeführt.

Aus Bild 5 wird deutlich, dass die Eigenschaften der Schweißverbindungen in y-Richtung nicht homogen waren. Bei der Trajektorien-Orientierung 0° (Bild 5a, d, g) wurden im unteren und oberen Teil der Segmente Bereiche mit einer überwiegenden Anbindung festgestellt. Bei den Orientierungen 45° (Bild 5b, e, h) und 90° (Bild 5c, f, i) ist nur im unteren Teil eine Anbindung zu erkennen. Im oberen Teil wurde die Anbindung durch die Endkrater der einzelnen Trajektorien verhindert.

Die Ursache für das vorzugsweise Auftreten der Bereiche mit überwiegend keiner Anbindung in den mittleren Abschnitten der Segmente war die verwendete Spanntechnik. In diesen Abschnitten wurde, wie bereits in Bild 4g–i gezeigt, ein Aufwölben der Folien beim Einspannen und beim Prozess beobachtet, weshalb in den mittleren Bereichen ein Nullspalt nicht gegeben war. Im Zusammenhang mit der verwendeten Spanntechnik beeinflusste die Trajektorien-Orientierung die resultierenden Verbindungseigenschaften. Wie angeführt, wurde mit der Trajektorien-Orientierung 0° absolut und auf die Gesamtnahtlänge normiert mit allen Schweißparametern die höchste Zugscherfestigkeit erreicht. Bei dieser Orientierung verliefen die einzelnen horizontalen Trajektorien entlang des gesamten oberen und unteren Rands der Schweißsegmente. In diesen Bereichen war die Fixierung durch die Spanntechnik am besten, weshalb von einem Nullspalt zwischen den Fügepartnern ausgegangen wird. Somit wurde eine überwiegende Anbindung erreicht. Bei den beiden anderen Trajektorien-Orientierungen war ein geringerer Anteil der Schweißnähte im oberen und unteren Bereich der Nahtsegmente und die resultierenden Zugscherkräfte waren geringer.

Im Vergleich der Schweißparameter waren bei Verwendung des Parametersatzes *P*1 (Bild 5a–c) mehr Durchbrände zu erkennen als bei *P*2 und *P*3 (Bild 5d–i). Von Parametersatz *P*1 bis *P*3 stieg bei gleichbleibender Pulsenergie die Pulsfrequenz an. Dadurch wurde der Leistungsverlauf eines einzelnen Laserpulses

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-21 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

flacher und die Spitzenleistung nahm ab [17]. Eine höhere Spitzenleistung ermöglichte größere Einschweißtiefen und erhöhte die Wahrscheinlichkeit eines Durchbrands.

Aus den Schweißversuchen mit Parametersatz *P*1 resultierten die geringsten Zugscherkräfte (siehe Bild 3). Daher ist anzunehmen, dass die Durchbrände die mechanische Integrität der Verbindung schwächten. Der im Vergleich zu *P*1 flachere Leistungsverlauf des Laserpulses bei den Parametersätzen *P*2 und *P*3 induzierte eine gleichmäßigere Erwärmung des Materials und die Ausbildung eines größeren Schmelzbads. Dies begünstigte die Spaltüberbrückung zwischen den Fügepartnern und führte zu einer erhöhten Anbindung bei *P*2 und *P*3 über den gesamten Schweißbereich. Somit wurden mit den Parametersätzen *P*2 und *P*3 höhere Zugscherfestigkeiten erreicht als mit Parametersatz *P*1.

4 Zusammenfassung

Das Laserstrahlschweißen von Aluminiumfolien hat für aktuelle und zukünftige Batterietechnologien eine große Bedeutung. Die Entstehung von Heißrissen zwischen der Schweißnaht und den Aluminiumfolien limitiert den industriellen Einsatz eines Laserstrahlschweißprozesses zur zellinternen Kontaktierung. Nanosekundenpuls-Laserstrahlquellen sind geeignete Werkzeuge, um diese Nahtdefekte zu vermeiden. Da diese Systeme nur ein geringes Schmelzevolumen erzeugen, ist die Spaltüberbrückung begrenzt. Spalte zwischen dem Folienstapel und dem Ableiter-Tab, die durch ein Aufwölben der Folien beim Schweißen entstehen, sind daher zu verhindern. Das Aufteilen der Schweißverbindung in Segmente in Kombination mit einer alternierenden Schweißreihenfolge verringerte thermische Verzüge der Fügepartner und erhöhte die Homogenität der Verbindung. Infolgedessen wurden gute mechanische Verbindungseigenschaften erzielt.

FÖRDERHINWEIS

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „InQuZell“ (Förderkennzeichen 03XP0342A) unter der Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) erarbeitet. Wir bedanken uns beim BMBF und dem Projektträger Jülich für die finanzielle Unterstützung und die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Literatur

[1] Vaalma, C.; Buchholz, D.; Weil, M. et al.: A cost and resource analysis of sodium-ion batteries. Nature Reviews Materials 3 (2018) 4, 18013
[2] Murray, J. L.: The Al–- Na (aluminum-sodium) system. Bulletin of Alloy Phase Diagrams 4 (1983) 4, pp. 407–410
[3] Shin, S.; Nam, S..; Yu, J. et al.: Ultrasonic Metal Welding of Multilayered Copper Foils to Nickel-Plated Copper Sheet in Lithium-Ion Battery Cell. Metals 11 (2021) 8: 1195, doi.org/10.3390/met11081195
[4] Patschger, A.: Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverständnis des Laserstrahl-Mikroschweißens von metallischen Folien. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2016
[5] Schedewy, R.; Beyer, E.; Brenner, B. et al.: Prospects of welding foils with solid state laser for lithium-ion batteries. 30th International Congress on Laser Materials Processing, Laser Microprocessing and Nanomanufacturing (ICALEO 2011), Orlando, Florida, USA, 2011, pp. 817–824
[6] de Bono, P.; Blackburn, J.: Laser welding of copper and aluminium battery interconnections. Industrial Laser Applications Symposium 2015, Kenilworth, United Kingdom, 2015, 96570M
[7] Mohseni, H.; Schmoeller, M.; Zaeh, M. F.: A Novel Approach for Welding Metallic Foils Using Pulsed-Laser Radiation in the Field of Battery Production. Laser in Manufacturing Conference 2019, Munich, 2019, #343
[8] Grabmann, S.; Tomcic, L.; Zaeh, M. F.: Laser beam welding of copper foil stacks using a green high power disk laser. Procedia CIRP 94 (2020), pp. 582–586
[9] Pricking, S.; Huber, R.; Klausmann, K. et al.: High-power CW and long-pulse lasers in the green wavelength regime for copper welding. SPIE LASE, San Francisco, California, United States, 2016, 97410G
[10] Alter, L.; Heider, A.; Bergmann, J.-P.: Investigations on copper welding using a frequency-doubled disk laser and high welding speeds. Procedia CIRP 74 (2018), pp. 12–16
[11] Zediker, M. S.; Fritz, R. D.; Finuf, M. J. et al.: Laser welding components for electric vehicles with a high-power blue laser system. Journal of Laser Applications 32 (2020) 2, #22038
[12] Grabmann, S.; Kriegler, J.; Harst, F. et al.: Laser welding of current collector foil stacks in battery production–mechanical properties of joints welded with a green high-power disk laser. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 118 (2021) 7–8, pp. 2571–2586
[13] Engelhardt, T.; Brandner, M.; Weber, R. et al.: Influence of Welding Parameters and Stack Configuration on Pore Formation of Laser Welded Aluminum Foil Stacks. Lasers in Manufacturing Conference, Munich, 2015, #270
[14] Nothdurft, S.; Seffer, O.; Hermsdorf, J. et al.: Investigations on laser beam welding of thin foils of copper and aluminum regarding weld seam quality using different laser beam sources. Journal of Laser Applications 34 (2022) 4, #042011
[15] Olowinsky, A.; Spurk, C.; Helm, J. et al.: Laser-based joining of electrode stacks for automated large-scale production of Li-ion battery cells. Energy Technology (2022), doi.org/10.1002/ente.202200770
[16] Grabmann, S.; Mayr, L.; Kick, M. K. et al.: Enhancing laser-based contacting of aluminum current collector foils for the production of lithium-ion batteries using a nanosecond pulsed fiber laser. Procedia CIRP 111 (2022), pp. 778–783
[17] Ascari, A.; Fortunato, A.; Dimatteo, V.: Short pulse laser welding of aluminum and copper alloys in dissimilar configuration. Journal of Laser Applications 32 (2020) 2, #022025

Sophie Grabmann, M.Sc.
Foto: TUM, iwb

Felix Harst, B.Sc.

Lukas Mayr, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. **Michael Zäh**

Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching bei München
Tel. +49 89 / 289-15493
sophie.grabmann@iwb.tum.de
www.iwb.tum.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-21 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY