

Neue Potentiale für die zellinterne Kontaktierung großformatiger prismatischer Lithium-Ionen-Batterien durch das Mikro-Rührreibschweißen

M. Sc. Martina E. Sigl, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

M. Sc. Sophie Grabmann, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

M. Sc. Amanda Zens, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Dr.-Ing. Roman Hartl, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Stichwörter: Lithium-Ionen-Batterien; zellinterne Kontaktierung; Mikro-Rührreibschweißen

1 Abstract

Geringe Produktionsgeschwindigkeiten und eine hohe Ausschussrate stellen Herausforderungen in der komplexen Fertigungskette von Lithium-Ionen-Zellen dar, welche für eine gelungene Energiewende hin zu elektrisch betriebenen Fahrzeugen gemeistert werden müssen. Im Forschungsprojekt *FSWBatt* konnte gezeigt werden, dass das Mikro-Rührreibschweißen eine mögliche Fügetechnologie darstellt, durch die beide Probleme für den Prozessschritt der zellinternen Kontaktierung gelöst werden können. In experimentellen Untersuchungen, welche am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München durchgeführt wurden, konnten Verbindungen zwischen den gestapelten Batteriefolien und den Zellelektroden mit exzellenten mechanischen und elektrischen Eigenschaften prozesssicher gefertigt werden. Ein Alleinstellungsmerkmal sind die geringen Taktzeiten von wenigen Zehntelsekunden, in welchen sogar große Folienstapel, bestehend aus 100 Folien, gefügt werden können. Das Mikro-Rührreibschweißen könnte damit ein Wegbereiter für die industrielle Produktion neuartiger großformatiger Batteriezellen werden.

2 Einleitung

Die Deckung des steigenden Bedarfs an Lithium-Ionen-Batterien [1], z. B. für elektrische Fahrzeuge, erfordert eine schnelle und zuverlässige Fertigung der Komponenten. Die Kernelemente der Batterien bilden die Zellen [2] (Beispiel in Abbildung 1a), welche schrittweise in einer komplexen Prozesskette gefertigt werden [3]. Einer dieser Schritte ist die zellinterne Kontaktierung (Abbildung 1b), bei welcher die beschichteten und gestapelten Trägerfolien durch Schweißen mit dem Ableiter verbunden werden [2]. Aufgrund der dünnen Fügepartner wird hierbei vom Mikroschweißen gesprochen.

Eine hohe Qualität der Schweißnähte ist wichtig, da der elektrische Strom der Zelle durch diese Verbindungsstellen fließt und die Leistungsfähigkeit der Zelle sonst negativ beeinflusst werden kann. Für die industriell etablierten Schweißverfahren (Ultraschall- und Laserstrahlschweißen) werden jedoch Schweißdefekte wie z. B. gerissene Folien [4, 5] bei einer gleichzeitig geringen Prozessrobustheit, z. B. gegenüber Folien-Oberflächenvariation, beschrieben [6]. Da die Bauteile bis dahin bereits eine hohe Wertschöpfung aufweisen, bedeutet ein Produktionsausschuss erhebliche Kosten [7]. Im Rahmen des Forschungsprojekts *FSWBatt* wurde daher eine alternative Fügetechnologie mit einem hohen Potential für die prozesssichere Fertigung hochwertiger Mikro-Schweißnähte untersucht: das Mikro-Rührreibschweißen (engl.: micro friction stir welding, kurz: μ FSW).

3 Anforderungen an die Fügeverbindungen

Im Rahmen des Projekts *FSWBatt* sollte das μ FSW für die zellinterne Kontaktierung qualifiziert werden. Hierfür wurden zunächst die folgenden allgemeinen Anforderungen (kurz: A) an den Fügeprozess sowie an die Verbindungen definiert. Der Prozess sollte keine thermische Schädigung der wärmeempfindlichen Batteriematerialien (z. B. Separatoren: kritische Temperatur von 90 °C [8], A1) sowie keine mechanische Schädigung der dünnen Folien (A2) bewirken. Abgelöste Nahtteile wurden aufgrund möglicher Kurzschlüsse in der Zelle als negativ bewertet (A3). Außerdem wurde eine hohe Verbindungsqualität mit einer hohen Reproduzierbarkeit (A4), eine

vollständige Anbindung aller Folien (A5), ein geringer elektrischer Widerstand (A6) sowie ein geringer Schweißgrat (A7) gefordert.

4 Vorgehen

Das Ziel wurde durch eine sukzessive und systematische Prozessentwicklung erreicht. Aufgrund der Neuheit des Verfahrens für diese Anwendung wurden zunächst die schweißtechnischen Rahmenbedingungen geschaffen, wozu z. B. die Auslegung von geeigneten Werkzeugen und Spannvorrichtungen gehörte. Danach wurden in den Hauptversuchen Proben in unterschiedlichen Füge stoß-Konfigurationen gefertigt. Dabei wurden Werkzeugmerkmale, die Werkzeugdrehzahl n (von 2300 bis 4800 U/min) sowie die Vorschubgeschwindigkeit v (Aluminium: von 100 bis 200 mm/min, Kupfer: von 25 bis 50 mm/min) variiert und die Anpresskräfte F_z , die Spindeldrehmomente M_s sowie die Temperaturen im Nahtnebenbereich T_N inline gemessen. Anschließend wurden die jeweiligen Verbindungseigenschaften (z. B. Oberflächenmerkmale, Zugfestigkeiten etc.) ermittelt und die Ergebnisse anhand der Anforderungen (A1 – A7) bewertet. Die abgeleiteten Verbesserungsmaßnahmen wurden anschließend umgesetzt und der Schweißprozess so sukzessive und systematisch hinsichtlich der Qualitätsmerkmale verbessert.

5 Bauteile, Werkzeuge und Spannvorrichtungen

Für die schweißtechnischen Untersuchungen wurden Werkstoffe gewählt, welche auch in der industriellen Zellproduktion verwendet werden: EN AW-1050A für die Kathodenfolien und -Ableiterbleche, Cu-PHC für die Anodenfolien und Cu-ETP für die Anoden-Ableiterbleche. Die Füge stoß-Konfigurationen „Mehrfach-Überlappstoß“ (Abbildung 2a) und „Mehrfach-Stumpfstoß“ (Abbildung 2b) stellten sich beide als geeignet für die Fügeaufgabe heraus. Die Hauptversuche wurden mit 30 Aluminiumfolien (Dicke von jeweils 15 μm) und 30 Kupferfolien (Dicke von jeweils 10 μm) durchgeführt, wobei im Projektverlauf auch Verbindungen mit 80 und 100 Folien fehlerfrei gefertigt wurden.

Für beide Füge stoß-Konfigurationen wurden mehrere Spannvorrichtungen (Beispiel in Abbildung 2c) konstruiert, gefertigt und getestet. Die Spannvorrichtungen hatten die Aufgabe, die feinen Folien an der Füge stelle aufeinanderzupressen und die Prozesskräfte abzuleiten. Aussparungen erlaubten ein schnelles und positionsgenaues Ein- und Ausspannen der Schweißproben. Es wurden mehrere Werkzeugvarianten mit verschiedenen Schweißstiftmerkmalen und Schulterstrukturen (Beispiel in Abbildung 2d) gefertigt und hinsichtlich der erreichten Nahtqualitäten untersucht. Im Vergleich zu konventionellen FSW-Werkzeugen waren die im Projektverlauf verwendeten Werkzeuge klein; sie wiesen einen Schulterdurchmesser von nur 3 mm auf.

6 Schweißversuche im Mehrfach-Überlappstoß und im Mehrfach-Stumpfstoß

Für beide Füge stoß-Konfigurationen konnten stabile Verbindungen in hoher Qualität erzeugt werden, was an der vollständigen Anbindung der unbeschädigten Folien (A2) in den Querschliffen ersichtlich ist (Abbildung 3). Es konnten geeignete Prozessparameter für defektfreie Nähte identifiziert werden. Werkzeugseitig wurden an den Mehrfach-Stumpfstoß geringere Anforderungen gestellt, da hier auch mechanisch stabile Verbindungen mit Werkzeugen erzeugt werden konnten, die keinen Schweißstift aufwiesen (Beispiel in Abbildung 3b).

Zur Bestimmung der mechanischen Verbindungsqualität (A5) wurden die kontaktierten Folien einzeln aus dem Stapel gezogen, wofür die Ableiterbleche formschlüssig (mit Spiel) fixiert wurden. Dabei zeigte sich, dass die Zugfestigkeiten der Aluminiumproben im Bereich derer des Grundwerkstoffs lagen (ca. 91 MPa [5]). Die Festigkeiten der Kupferproben wurden im Gegensatz dazu durch den Schweißprozess reduziert, lagen aber mit ca. 163 MPa dennoch über denen der Aluminiumproben, was bedingt ist durch die hohe Festigkeit des Grundwerkstoffs (Kupfer: 367 MPa [5]). Für die mechanische Auslegung der Batteriezellen ist daher trotz der geringeren Dicke der Kupferfolien von 10 μm (im Vergleich zu 15 μm für die Aluminiumfolien) die durch den Schweißprozess unveränderte Festigkeit der Aluminiumproben entscheidend.

Der elektrische Widerstand (A6) der Verbindungen wurde durch die Vierpunktmethode mit jeweils 18 mm entfernten Messspitzen bestimmt. Hierfür wurden 24,5 mm breite Querschnitte aus den Schweißproben ent-

nommen, die Folienstapel in der Mitte auseinandergefaltet und die Spannung von einer außenliegenden und zusätzlich isolierten Folie zu der anderen gemessen, was bedeutet, dass beide Folien nur über die Schweißung miteinander verbunden waren. Sowohl für Aluminium- als auch für Kupfer-Linienschweißungen konnten hohe elektrische Leitfähigkeiten erreicht werden. Für Aluminium lagen die gemessenen Gesamtwiderstände im Bereich derjenigen des Grundwerkstoffs (1,41 m Ω) und für Kupfer leicht darüber (1,47 m Ω anstatt 1,33 m Ω).

Die Nahtoberflächen wiesen die für das FSW typischen Merkmale wie einen Nahtunterhang und einen Schweißgrat auf. Mit dem Ziel reduzierter Grathöhen (A7) wurde als eine Verbesserungsmaßnahme der Einsatz von Werkzeugen mit stationärer Schulter untersucht. Dadurch konnte die maximale Grathöhe von 1,1 mm auf 0,24 mm verringert werden (Beispiel in Abbildung 4).

Aufgrund der hohen Stabilität der Nähte und für ein reduziertes Nahtvolumen wurde als weitere Prozessvariante und Verbesserungsmaßnahme das Punktschweißen (engl.: micro friction stir spot welding, μ FSSW) untersucht. Für die Punktschweißungen (Abbildung 5) zeigte sich, dass auch ohne ein Verweilen des Werkzeugs im Bauteil (d. h. eine Verweilzeit von 0 s) hochwertige Verbindungen erzeugt werden können. Bei dieser Prozessvariante erfolgt der Zurückziehvorgang direkt nach dem Eintauchen des Werkzeugs in die Fügepartner. Aufgrund der positiven Ergebnisse und wegen des Zeitvorteils von Punkt- gegenüber Linienschweißungen wurden weitere Prozessuntersuchungen für das μ FSSW durchgeführt.

Für die Bestimmung der mechanischen und der elektrischen Eigenschaften wurden wie bei den Linienschweißungen 24,5 mm breite Querschnitte aus den Schweißproben entnommen, wobei jedes Reihenpunktprüfstück drei gleiche Schweißpunkte aufwies. Für die Aluminiumproben lagen die Anbindungsfestigkeiten (A5) der einzelnen Folien im Bereich derjenigen des Grundwerkstoffs (ca. 91 MPa). Für die Kupferproben waren die Festigkeiten der Punktschweißungen im Vergleich zu den Linienschweißungen leicht reduziert (ca. 155 MPa anstatt 163 MPa), lagen jedoch weiterhin deutlich über denen der Aluminiumproben, was daher als nicht kritisch bewertet wurde. Die Festigkeit in den Kupferschweißproben stieg mit der Werkzeugdrehzahl n .

Die elektrischen Widerstände der Punktschweißungen (A6) waren im Vergleich zu den Linienschweißungen für Aluminium (1,52 m Ω anstatt 1,41 m Ω) sowie für Kupfer (1,51 m Ω anstatt 1,47 m Ω) leicht erhöht. Die Ausnahme bildeten Proben eines Schweißwerkzeugs mit einem quadratisch-konischen Schweißstift (Kupfer: 1,46 m Ω). Generell waren die elektrischen Leitfähigkeiten nach Verwendung von Werkzeugen höher, welche materialflussfördernde Strukturen aufwiesen (z. B. quadratischer Stift, Gewindestift, Schulterstrukturen). Die Ergebnisse deuten auf einen Einfluss der Nahtmorphologie auf die elektrischen Leitfähigkeiten hin.

Die inline gemessenen Anpresskräfte F_z waren geringer als beim konventionellen Rührreibschweißen, was mit den kleinen Dimensionen der Werkzeuge (siehe Abbildung 2d) erklärt werden kann. Für Aluminium wurden maximale Werte von 550 N und für Kupfer maximale Werte von 2400 N gemessen. Die Spindeldrehmomente M_S bewegten sich in Bereichen von weniger als 0,4 Nm (Aluminium) bzw. weniger als 1,5 Nm (Kupfer). Die maximalen gemessenen Temperaturen T_N in einem Abstand von 4,5 mm zum Schweißpunktzentrum lagen stets bei unter 90 °C (A1), wobei die Versuche, für welche das Werkzeug mit dem quadratisch-konischen Schweißstift benutzt wurde, eine Ausnahme hiervon bildeten.

Die hohe Reproduzierbarkeit der Nahtergebnisse (A4) wurde durch das dreimalige Wiederholen der Schweißversuche (d. h. vier Schweißpunkte pro Werkzeug und Werkstoff) nachgewiesen. Dabei zeigte sich, dass Werkzeuge mit Schweißstift nur bedingt für Aluminium-Punktschweißungen geeignet sind, da es hier zu Anhaftungen am Werkzeug kam, was zu einer erhöhten Gratbildung führte. Für Werkzeuge ohne Schweißstift lagen die Werte für die maximale Grathöhe bei nur 0,3 mm. Im Gegensatz dazu konnte für die Kupferschweißungen kein negativer Einfluss eines Schweißstifts auf die Schweißnahtoberflächenqualität festgestellt werden. Die maximalen Grathöhen lagen für das beste getestete Werkzeug (unstrukturierte Schulter mit zylindrisch-konischem Schweißstift) bei 0,06 mm. Ob es während der Nutzungszeit zu einem Ablösen des Schweißgrats kommt, ist derzeit noch ungeklärt und wird daher Gegenstand weiterer geplanter Forschungsaktivitäten sein. Während der Punktschweißversuche konnte keine Partikelablösung festgestellt werden (A3).

7 Fazit und Vergleich mit industriell etablierten Schweißverfahren für die zellinterne Kontaktierung

Sowohl im Mehrfach-Überlappstoß als auch im Mehrfach-Stumpfstoß konnten im Projektverlauf qualitativ hochwertige Verbindungen erzeugt werden, durch welche die zuvor definierten Anforderungen (A1– A7) er-

füllt werden. Im Folgenden werden Empfehlungen bezüglich der Prozessführung gegeben, welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

Bewährt haben sich im Projektverlauf Schweißwerkzeuge mit einer stationären Schulter sowie das Punktschweißen. Durch beide Ansätze konnten Oberflächenerhebungen, bei einer gleichwertig hohen mechanischen Qualität reduziert werden. Das Punktschweißen bringen jedoch auch einen zusätzlichen Zeitvorteil mit sich, da ohne den Verweilschritt ein Schweißpunkt in wenigen Zehntelsekunden gefertigt werden kann. Für ein Werkzeug ohne Schweißstift errechnet sich eine Gesamt-Schweißdauer von 0,3 s aus den Geschwindigkeiten des Eintauch- (z. B. 25 mm/min) und des Zurückziehgeschwindigkeit (z. B. 100 mm/min) sowie der Eintauchtiefe des Werkzeugs (z. B. 0,1 mm). Hierbei sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den genannten Geschwindigkeiten nicht um Maximalwerte handelt, was heißt, dass eine weitere Erhöhung der Prozessgeschwindigkeiten als technisch möglich angesehen wird. Für eine gleichzeitige Fertigung mehrerer Schweißpunkte wird die Verwendung von Mehrspindelköpfen empfohlen. Ansonsten können Schweißpunkte auch nacheinander gefertigt werden, wobei sich z. B. Verfahrszeiten von 0,05 s für jeden Schweißpunkt ergeben (Verfahrstrecke von z. B. 9 mm, Beschleunigung und Verzögerung von z. B. $|4| \text{ m/s}^2$). In Bezug auf die Prozessgeschwindigkeiten ist das μ FSSW damit konkurrenzfähig gegenüber dem Ultraschall- [4] und dem Laserstrahlschweißen [5]. Der einzige Nachteil, der für Punktschweißungen ausgemacht werden konnte, sind die leicht erhöhten elektrischen Widerstände. Ob diese Erhöhungen jedoch auch industriell relevant sind, ist derzeit aufgrund der unterschiedlichen Probengeometrien der Konkurrenzverfahren noch unbekannt. Die vergleichsweise [6, 5] hohe Verbindungsqualität lässt jedoch keine Nachteile durch das μ FSSW vermuten. Außerdem sind weitere Verbesserungen der elektrischen Leitfähigkeiten durch weiterentwickelte Werkzeugstrukturen zu erwarten.

Als Alleinstellungsmerkmal des Verfahrens sind die hohen Prozessgeschwindigkeiten zu sehen, mit welchen auch große Folienstapel in hoher Qualität gefügt werden können. Demonstriert wurde dies durch die Kontaktierung von je 100 unbeschichteten Kupfer- sowie Aluminiumfolien einer prismatischen Zelle (Abbildung 6). Das Verfahren erlaubt damit die schnelle zellinterne Kontaktierung neuartiger, großformatiger Batteriezellen mit einer hohen Energiedichte und geringen Ladedauer [9].

8 Schlussbemerkungen

Aufgrund der hohen Nahtqualitäten und Prozessgeschwindigkeiten stellt insbesondere das μ FSSW sowohl für die Fertigung konventioneller als auch großformatiger Batteriezellen ein vielversprechendes Verfahren dar. In weiteren Forschungstätigkeiten sollen daher die nächsten Schritte zur Weiterentwicklung des Verfahrens für die industrielle Anwendung untersucht werden. Dazu gehört die Integration in die Prozesskette der Batterieproduktion und die Befähigung des Verfahrens zur Fertigung in einer Batterie-Produktionsumgebung (Trockenraum). Ein entsprechendes Forschungsprojekt ist bereits am *iwb* geplant. Weiterhin von Interesse ist die geometrische Gestaltung der Naht (z. B. die Anzahl und Morphologie der Schweißpunkte), da davon die elektrischen Eigenschaften abhängen.

9 Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 48 EWN/DVS-Nummer 05.3090 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Zudem gilt der Dank den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für ihre Unterstützung über die zweijährige Projektlaufzeit hinweg, insbesondere bei den Projektpaten Herrn Dr.-Ing Rüdiger Daub (seit Juni 2021: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub) und Herrn Dr.-Ing. Martin Hiller von der BMW AG.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

10 Literatur

- [1] A. Thielmann, A. Sauer, M. Wietschel: Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Technologie-Roadmapping am Fraunhofer ISI. 2015.
- [2] A. Das, D. Li, D. Williams, D. Greenwood: Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing. World Electric Vehicle Journal 9 (2018) 2, 22.
- [3] A. Kampker: Elektromobilproduktion. 1. Auflage, Springer, Berlin. 2014. ISBN: 978-3-642-42021-4.
- [4] S. Shin, S. Nam, J. Yu, J. Park, D. Kim: Ultrasonic Metal Welding of Multilayered Copper Foils to Nickel-Plated Copper Sheet in Lithium-Ion Battery Cell. Metals 11 (2021) 8, 1195.
- [5] S. Grabmann, J. Kriegler, F. Harst, F.J. Günter, M.F. Zaeh: Laser welding of current collector foil stacks in battery production – mechanical properties of joints welded with a green high-power disk laser. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 118 (2022) o. Nr., S. 2571–2586.
- [6] S.S. Lee, T.H. Kim, S.J. Hu, W.W. Cai, J.A. Abell: Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review. Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (Erie, USA, 12. – 15.10.2010). New York, USA: ASME. 2011, S. 541–549. ISBN: 978-0-7918-4946-0.
- [7] A. Kwade, W. Haselrieder, R. Leithoff, A. Modlinger, F. Dietrich, K. Droeder: Current status and challenges for automotive battery production technologies. Nature Energy 3 (2018) 4, S. 290–300.
- [8] Celgard, L. C. C.: Datenblatt High Performance Battery Separators. 2009.
- [9] I.D. Campbell, K. Gopalakrishnan, M. Marinescu, M. Torchio, G.J. Offer, D. Raimondo: Optimising lithium-ion cell design for plug-in hybrid and battery electric vehicles. Journal of Energy Storage 22 (2019) o. Nr., S. 228–238.

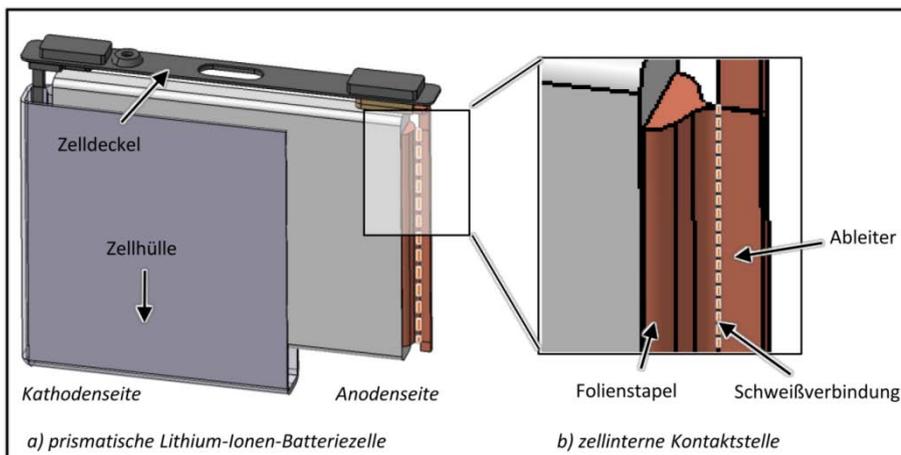


Abbildung 1: a) Prismatische Lithium-Ionen-Batteriezelle
b) mit der zellinternen Kontaktstelle

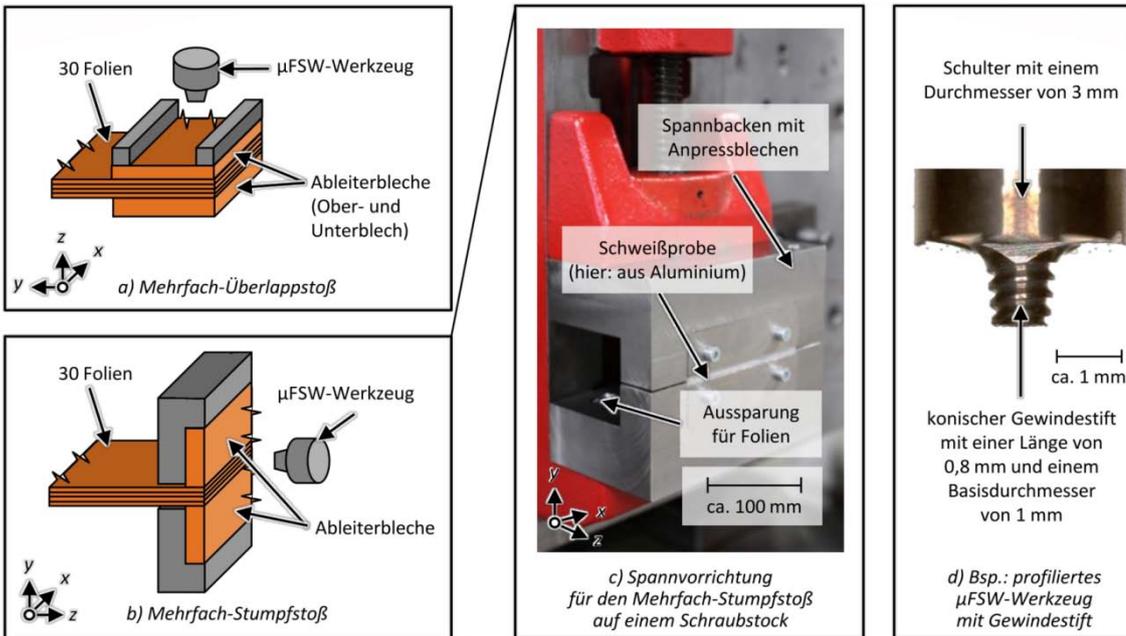


Abbildung 2: Schemaskizze a) des Mehrfach-Überlappstoßes und b) des Mehrfach-Stumpfstoßes (Spannelemente und Werkzeuge in grau) sowie Fotografeaufnahme c) einer Spannvorrichtung und d) eines µFSW-Werkzeugs

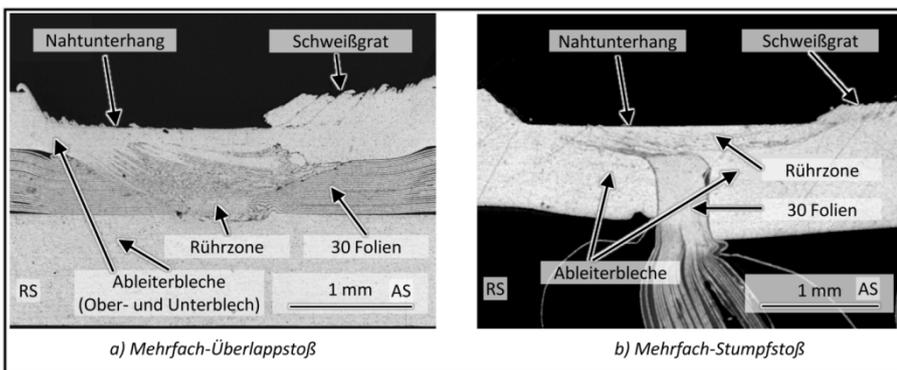


Abbildung 3: Querschliffe von Aluminium-Linienschweißproben, welche a) im Mehrfach-Überlappstoß und b) im Mehrfach-Stumpfstoß geschweißt wurden; AS: advancing side (dt.: Gleichlaufseite), RS: retreating side (dt.: Gegenlaufseite)

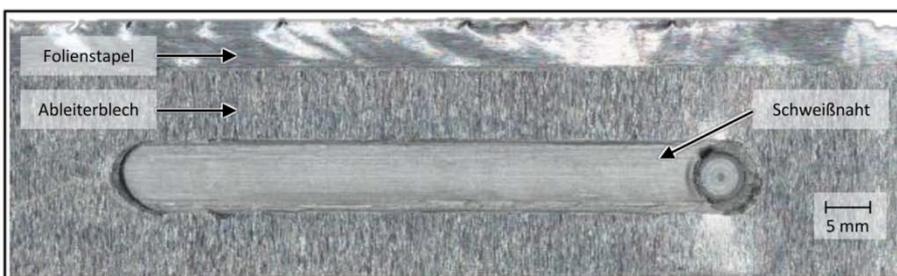


Abbildung 4: Stehende-Schulter-Schweißnaht im Mehrfach-Überlappstoß

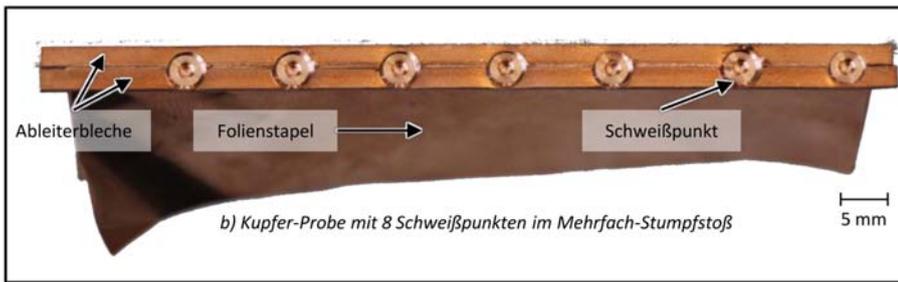


Abbildung 5: Schweißpunkte im Mehrfach-Stumpfstoß

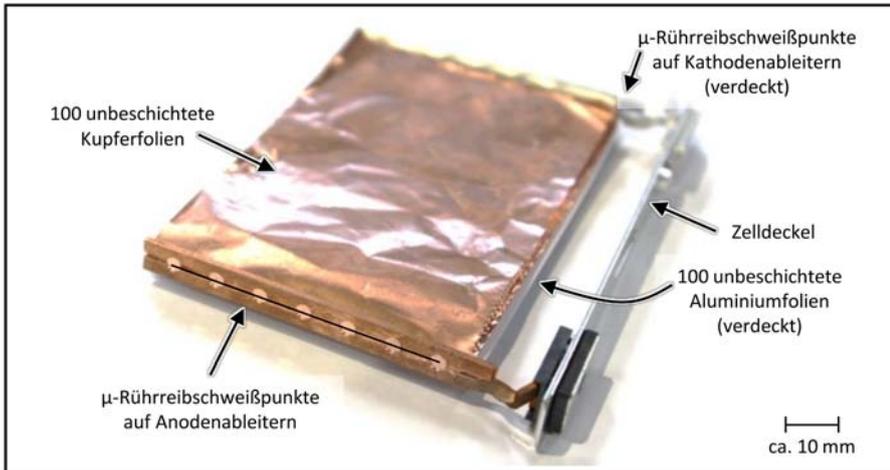


Abbildung 6: Demonstrator mit kontaktierten 100-lagigen Kupfer- und Aluminiumfolienstapeln

Tabelle 1: Empfehlungen für das μ FSW von Trägerfolien und Ableitern für Batteriezellen

Ziele	werkstoffspezifische Empfehlungen	
	Aluminium	Kupfer
geringe Temperaturen im Nahtnebenbereich (A1)	Einhalten eines Abstands von mindestens 4,5 mm zum Schweißpunktzentrum	
keine mechanische Schädigung der Folien (A2)	Verwenden geeigneter Prozessparameter	
keine abgelösten Nahtteile (A3)	Reduzieren von Oberflächenerhebungen (siehe A7)	
hohe Reproduzierbarkeit (A4)	Verwenden von Werkzeugen ohne Schweißstift	(keine Empfehlungen, da keine negativen Beobachtungen)
hohe mechanische Stabilität (A5)	(keine Empfehlungen, da keine negativen Beobachtungen)	Verwenden von Werkzeugen mit Strukturen und/oder mit Schweißstift
geringer elektrischer Widerstand (A6)	Linienschweißen bzw. Verwenden von Werkzeugen mit materialflussfördernden Strukturen	
geringer Schweißgrat (A7)	Verwenden von Werkzeugen mit stationärer Schulter oder Punktschweißen mit Werkzeugen ohne Schweißstift (nur Aluminium)	
hohe Prozessgeschwindigkeit	Punktschweißen	