



Fraunhofer

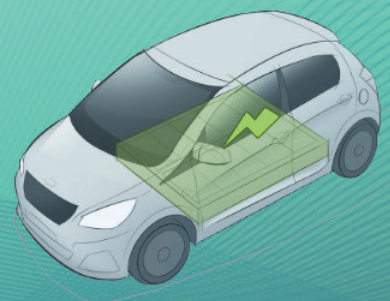
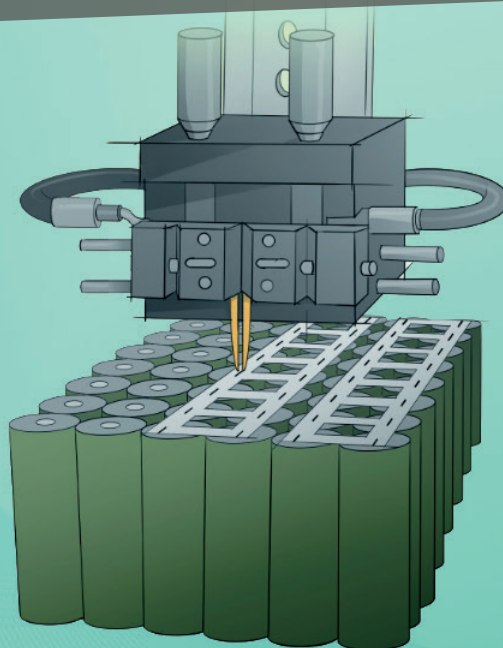
ISE

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

REPORT ZUR BATTERIEVERSCHALTUNG MATERIALIEN – TECHNOLOGIEN – MARKTSITUATION

Oktober 2021

WHITE PAPER



Herausgeber

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
Telefon +49 761 4588-0
www.ise.fraunhofer.de

Autoren

Christian Schiller
Achim Kraft

Anmerkung

Die Autoren danken den befragten Firmen für ihre Offenheit und die umfassenden Antworten. Die damit gewonnenen Einblicke sollen durch diese Veröffentlichung allen zugutekommen. Diese Arbeit entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsprojekts ELVis (Förderkennzeichen 03EI4019B). Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.

Die Autoren danken M. J. Brand für die freundliche Bereitstellung der Originalvektorgrafik Fig. 9 aus [17]. Die Verantwortung für diese Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

Einleitung	2
Materialien	4
Zellverbinder	4
Fügestellen	5
Technologien	7
Laserstrahlschweißen	8
Schrauben	8
Ultraschallschweißen	8
Widerstandsschweißen	9
Weichlöten	10
Marktsituation	12
Produktion und Entwicklungspotential	15
Fazit	18
Literaturverzeichnis	19

Einleitung

Die zunehmende Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien erfordert geeignete Batteriespeicher, um das verfügbare Angebot aus Wind- und Sonnenenergie und die Nachfrage auszugleichen [1]. Neben dem wachsenden Bedarf für Batteriespeicher im Stromnetz, entwickeln sich auch die Technologien von aufladbaren Batterien stetig weiter [2]. Insbesondere Lithium-Ionen-Batterien stehen aufgrund ihrer Energie- und Leistungsdichten im Fokus der Elektromobilität. Neben den daraus resultierenden Economy-of-Scale Effekten weisen Lithium-Ionen-Batterien aber auch für stationäre Anwendungen sehr interessante Charakteristiken auf [3, 4]. Je nach Anwendung kommen derzeit entweder Pouchzellen, prismatische Zellen oder Rundzellen, die auch als zylindrische Zellen bezeichnet werden, zum Einsatz [4]. Um die Strom- und Spannungswerte von batteriebetriebenen Geräten zu erreichen, werden einzelne Batteriezellen zu Batteriemodulen bzw. Batteriepacks zusammengesetzt und seriell oder parallel elektrisch verschaltet [5–7].

In einem Batteriemodul setzen sich die elektrischen Widerstände zwischen den Zellen aus den Widerständen der Zellverbinder und den Kontaktwiderständen der Fügestellen zwischen den Zellverbindern und den Batterieterminals bzw. -tabs zusammen. Durch unterschiedliche Strom- und damit Widerstandspfade von der angelegten Last zu den einzelnen Zellen werden die einzelnen Batterien im Betrieb unterschiedlich stark belastet [8]. Maßgeblichen Einfluss auf die Widerstandspfade haben die Kontaktwiderstände der Fügestellen. Weichen diese innerhalb eines Batteriemoduls stark voneinander ab, folgt daraus eine noch ungleichmäßigere Verteilung des Stroms (siehe Abb. 1) [8–10]. Dies hat eine stärkere Belastung einzelner Zellen zur Folge und beeinflusst einerseits deren Ladezustand (state-of-charge, SoC) und langfristig auch deren Alterungszustand (state-of-health, SoH). Andererseits wird an den größeren Kontaktwiderständen mehr Wärme generiert. In der Konsequenz wird die Degradation dieser Zellen begünstigt, was zu einer inhomogenen Alterung der Zellen im Batteriemodul führt. Eine starke Überhitzung und in letzter Konsequenz auch ein *thermal runaway* einzelner Zellen wird wahrscheinlicher [8, 9, 11]. Daher spielt die auch Qualität jeder einzelnen Fügestelle zwischen Batterieterminals beziehungsweise -tabs und Zellverbindern im Batteriemodul eine entscheidende Rolle für dessen Betriebsverhalten und Langzeitstabilität.

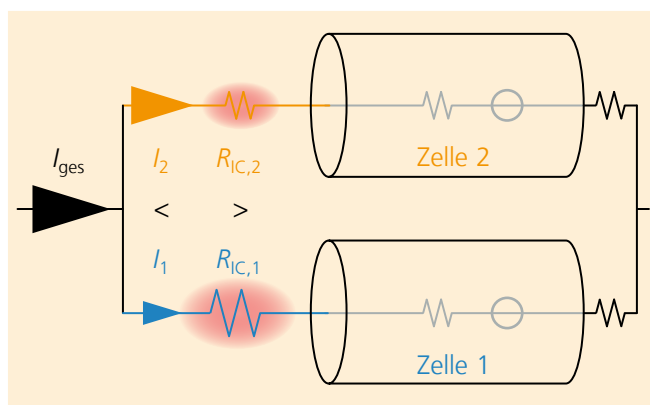


Abb. 1 Zwei parallel verschaltete Batteriezellen mit unterschiedlichen elektrischen Kontaktwiderständen ($R_{C,1} > R_{C,2}$). Daraus resultieren ungleiche thermische und elektrische Lasten ($I_1 < I_2$) an den Batteriezellen. Nach [9].

© Fraunhofer ISE

In diesem Report liegt daher der Fokus auf der elektrischen Verschaltung der Batterie-terminals bzw. -tabs mit den Batterie-Zellverbindern. Wir vergleichen verschiedene Fügeverfahren sowie Zellverbinder-Materialien und untersuchen die Vorteile und Herausforderungen der jeweiligen Technologien und Materialien. Neben der theoretischen Betrachtung der Technologien anhand von Literatur enthält dieser Report auch die Ergebnisse einer Umfrage bei Marktteilnehmern zur aktuellen Marktsituation im deutschsprachigen Raum. Bei der Frage nach den eingesetzten Verschaltungstechnologien zeigen die Ergebnisse der Befragung eine klare Präferenz zum Widerstandsschweißen. Daher gilt diesem Verfahren in diesem Report die besondere Aufmerksamkeit.

Einleitung

Materialien

Zellverbinder

Im Idealfall ist der Zellverbinder-Widerstand, der sich aus dem spezifischen Widerstand des Zellverbinder-Materials und dem Kontaktwiderstand zwischen Verbinder und Zelle zusammensetzt, im Batteriemodul vernachlässigbar klein. Der Strom würde sich in diesem idealen Fall homogen auf alle Zellen im Modul verteilen [8]. In der Praxis lässt sich dies allerdings nicht erreichen. Ziel ist es aber, diesem Zustand so nahe wie möglich zu kommen.

In sehr vielen Anwendungen, insbesondere in der Elektromobilität, ist die Schnellladefähigkeit eine zentrale Anforderung für Batteriepacks. Kürzere Ladezeiten ermöglichen beispielsweise im Nutzfahrzeugsegment eine wirtschaftlichere Auslastung durch geringere Standzeiten. Um kurze Zeiten an den Ladestationen zu ermöglichen, müssen jedoch hohe Ströme übertragen werden. Dies sollte mit möglichst geringen thermischen Verlusten geschehen, um sowohl wirtschaftlich als auch ressourcenschonend zu handeln. Eine hohe elektrische Leitfähigkeit des Zellverbindermaterials oder entsprechend groß dimensionierte Leitungsquerschnitte ermöglichen die geforderte Stromtragfähigkeit. Aus praktischen und wirtschaftlichen Überlegungen (z. B. Bauraum und Kosten) sowie zur Schonung natürlicher Ressourcen ist in einigen Anwendungen die Möglichkeit, große Leitungsquerschnitte zu realisieren, nicht gegeben. Metalle mit hoher elektrischer Leitfähigkeit sind in absteigender Reihenfolge: Silber, Kupfer, Gold, Aluminium, Magnesium, Wolfram, Zink, Nickel und Eisen [12, Abs. 12]. Der für viele Batterie-Komponenten häufig genutzte vernickelte Stahl (Hilumin) hat annähernd die gleiche Leitfähigkeit wie Eisen. Von den genannten Elementen sind in absteigender Reihenfolge Aluminium, Eisen und Magnesium, gefolgt von Nickel, Zink und Kupfer bezogen auf ihren Massenanteil am häufigsten in der Erdkruste vertreten (siehe Tab. 01) [12, Abs. 14]. Die Häufigkeit der Metalle korreliert in etwa auch mit ihrem Preis. Allerdings spielen auch Faktoren wie Produktionsaufwand bzw. Herstellungskosten und Nachfrage eine entscheidende Rolle bei der Preisgestaltung. Aktuell liegt zum Beispiel der Kupferpreis bei dem rund drei- bis vierfachen des Aluminiumpreises¹. Neben der Leitfähigkeit und den Kosten ist auch die Verarbeitbarkeit der Materialien ein entscheidendes Kriterium. Die Verarbeitbarkeit hängt wiederum stark von dem eingesetzten Fügeverfahren ab. Zudem sind die Prozessbedingungen nicht unerheblich, was die Lagerung, das Handling und das Fügen an Umgebungsluft betrifft. Problematisch kann z. B. die Oxidbildung sein. Darüber hinaus ist die Wahl der Zellverbinder abhängig von den eingesetzten Batteriezellen und den Materialien der Batterieterminals. Schlussendlich bleibt die Materialauswahl für Zellverbinder eine Auslegungsfrage des Systems. Aus der Gegenüberstellung von elektrischer Leitfähigkeit und dem Vorkommen in der Erdkruste in Tabelle 01 ergeben sich zwei Metalle, die aufgrund ihrer guten Leitfähigkeit bei mäßiger Verfügbarkeit bzw. ihrer guten Verfügbarkeit bei akzeptabler Leitfähigkeit besonders geeignet sind, um hohe Ströme zu übertragen: Kupfer und Aluminium. In Ta-

¹ <https://www.finanzen.net/rohstoffe/kupferpreis>; <https://www.finanzen.net/rohstoffe/aluminiumpreis>, abgerufen am 24.11.2020

belle 1 ist die Dichte zusätzlich zur Orientierung angegeben, falls das Gewicht des Batteriemoduls in der Anwendung eine Rolle spielt.

Metall	Elektrische Leitfähigkeit / S/m	Vorkommen in der Erdkruste / mg/kg	Dichte / g/cm ³
Silber	61,84·10 ⁶	7,50·10 ⁻²	10,5
Kupfer	58,41·10 ⁶	6,00·10 ¹	8,96
Gold	44,35·10 ⁶	4,00·10 ⁻³	19,3
Aluminium	36,91·10 ⁶	8,23·10 ⁴	2,70
Magnesium	22,32·10 ⁶	2,33·10 ⁴	1,74
Wolfram	18,55·10 ⁶	1,00·10 ⁻³	19,3
Zink	16,64·10 ⁶	7,00·10 ¹	7,14
Nickel	14,04·10 ⁶	8,40·10 ¹	8,90
Eisen	10,13·10 ⁶	5,63·10 ⁴	7,87

Tab. 1 Übersicht über Metalle, die aufgrund ihrer Leitfähigkeit bei Raumtemperatur (298 K) für den Einsatz als Batterie-Zellverbinder geeignet sind. Werte aus [12]. Die Ampelfarben kennzeichnen die Leitfähigkeit und das Vorkommen der Metalle.

Für beide Metalle gibt es allerdings Herausforderungen, die bei der Wahl des Fügeverfahrens und dessen Durchführung beachtet werden sollten. Fällt die Wahl bei der Auslegung des Systems auf die Verwendung von Kupfer als Zellverbindermaterial, sollte hochreines Kupfer (z. B. Cu-HCP) verwendet werden. Dies trifft zumindest auf Fügeverfahren zu, bei denen die Fügepartner geschmolzen werden und wieder abkühlen. Sauerstoff liegt in Kupferwerkstoffen in gebundener Form von Cu₂O vor. Dieses Kupferoxid wird beim Abkühlen der Schmelze durch Rekristallisation umverteilt, sodass es sich an Korngrenzen ablagert. Das hat negativen Einfluss auf die mechanische Stabilität, weil die Ablagerung zu spröden Phasensäumen führt [13, 14].

Aluminium bildet mit dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff ein schützendes Oxid: Al₂O₃. Diese natürliche Oxidschicht beeinträchtigt neben der hohen thermischen und elektrischen Leitfähigkeit das Widerstandsschweißen von Aluminium [2]. Das Aluminiumoxid und die hohe Reflexion der Oberfläche erschweren die Verarbeitung von Aluminium mittels Laserschweißen. Ohne Schutzgas bildet sich beim Fügen von Aluminium die Oxidschicht stets schnell neu aus, was die Qualität der Schweißung beeinträchtigen kann [14]. Beim Ultraschallschweißen kann die Aluminiumoxidschicht durch die hohen Frequenzen entfernt werden [15]. Des Weiteren kann Al₂O₃ den resultierenden elektrischen Kontaktwiderstand zwischen Zellverbinder und Batterieterminal stark erhöhen [11, 16].

Fügestellen

Die geforderte hohe elektrische Leitfähigkeit bedingt das Fügen hochreiner Metalle, was eine Herausforderung an die Prozessführung darstellt. Neben dem Aspekt des artgleichen Fügens hochreiner Metalle tritt bei der Verbindung von Batteriezellen zu Batteriemodulen und -packs das artverschiedene Fügen. Die Verschaltungstopologie, die Art der Zellen und der Zellverbinder entscheiden darüber, ob und wie viele artgleiche und artverschiedene Fügestellen im Batteriemodul vorhanden sind. So haben Rundzellen meist Terminals aus vernickeltem Stahl, wohingegen die Terminals von prismatischen Zellen oft aus Kupfer bzw. Aluminium oder Nickel bestehen; Pouchzellen

werden über Tabs (Laschen) aus Aluminium- und Kupferfolie kontaktiert [9, 11]. Werden verschiedene Metalle gefügt – zum Beispiel Kupfer und Aluminium – können in der Fügestelle (intermetallische) Phasen entstehen [11]. Vor allem bei aufschmelzenden Schweißverfahren werden verschiedene harte Aluminium-Kupfer-Phasen gebildet, die zur Versprödung und zu einer stark verminderten elektrischen Leitfähigkeit der Fügestelle führen [13, S. 48, 14]. Während des Betriebs können erhöhte Temperaturen sowie Stromfluss durch die Fügestelle die Diffusion von Ionen oder Atomen begünstigen, was zu unkontrollierter Bildung von intermetallischen Phasen führen kann [11]. Daneben weisen Fügstellen von Metallen mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei Wärmegeneration – zum Beispiel durch hohe Ladeströme – eine inhomogene thermische Ausdehnung auf. Diese kann die mechanische Stabilität und die elektrischen Kontaktwiderstände negativ beeinflussen. Der elektrische Kontaktwiderstand wird ebenfalls von Schäden durch Materialermüdung vergrößert [11].

Es existieren verschiedene Methoden, um intermetallische Phasen und deren Auswirkungen zu vermeiden. Neben der Verwendung von Batteriezellen, deren Terminals aus demselben Material bestehen wie die Zellverbinder, gibt es auch die Möglichkeit (i) für das direkte Fügen unterschiedlicher Metalle nicht-aufschmelzende Fügeverfahren einzusetzen oder (ii) Zwischenelemente herzustellen, die zwischen die beiden zu fügenden Metalle – zum Beispiel Kupfer und Aluminium – gebracht und jeweils einseitig artgleich gefügt werden (siehe Abb. 2) [14]. Eine weitere Methode besteht darin, die hochleitfähigen Metalle galvanisch zu beschichten (z. B. Hilumin, vernickeltes Kupfer).

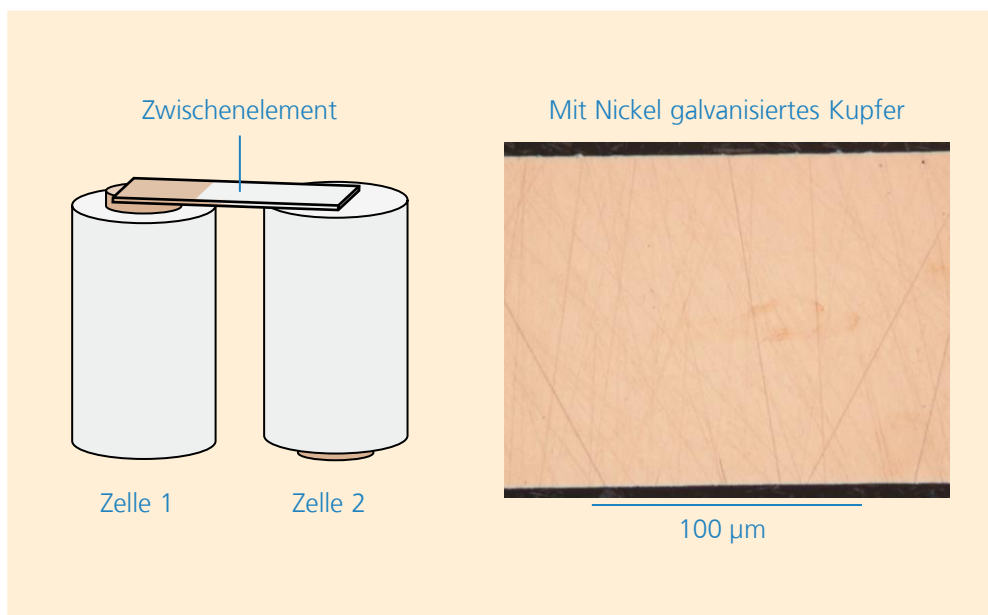


Abb. 2 Links ist schematisch ein Zwischenelement gezeigt, welches auf beiden Zellen jeweils artgleich gefügt werden kann. Rechts ist eine digital-mikroskopische Aufnahme eines mit Nickel galvanisierten Kupferverbinders im Querschnitt abgebildet.

© Fraunhofer ISE

Technologien

Neben die bereits erwähnten Herausforderungen für qualitativ hochwertige Fügestellen in Batteriemodulen treten die spezifischen Anforderungen der Fügeverfahren. Tabelle 2 gibt einen Überblick über einige mögliche Fügeverfahren [2, 7, 11]. Nicht jedes Fügeverfahren ist für jede Batterie-Bauform oder Anwendung geeignet. Die Herausforderung besteht darin, die geeignete Verbindungstechnik und die jeweiligen Prozessparameter zu ermitteln [9].

Fügeverfahren	Vorteile	Nachteile
Laserstrahlschweißen	Schnell, effizient, berührungsloser Prozess, einfach zu automatisieren, geringer thermischer Eintrag, hohe Präzision	Hohe Investitionskosten, präzise Ausrichtung der Fügeteile nötig, hochreflektive Materialien, artverschiedenes Fügen, Prozess- und Qualitätskontrolle
Schrauben	Lösbare Verbindungen, einfaches Recycling und Reparatur, kein Wärmeeintrag	Elektrische Kontaktwiderstände, Kosten, zusätzliches Gewicht, sich lockernde Schrauben
Ultraschallschweißen	Schnell, gut geeignet für hochleitfähige Materialien, artverschiedene Werkstoffe, geringer Energiebedarf, geeignet für Drähte und dünne oder mehrlagige Bleche, keine Zusatzwerkstoffe oder Gase, geringer Kontaktwiderstand und hohe mechanische Stabilität	Einklemmen der Batterie, beschränkt auf Überlappungsverbindungen, teure Verbrauchsmaterialien, empfindlich gegenüber Oberflächenbeschaffenheit, hohe Temperaturen [9], herausfordernd bei festen und harten Materialien
Widerstandsschweißen	schnell, günstig, keine Zusatzwerkstoffe oder Gase, geringer Wärmeeintrag, effizient und gut zu automatisieren, existierende Technologien für die Qualitätskontrolle	hochleitfähige Werkstoffe, artverschiedenes Fügen, Elektrodenverschleiß, Gefahr von Schweißbadspritzern, schwierig große Fügestellen herzustellen
Weichlöten	Sehr geringer Kontaktwiderstand [17], artverschiedene Materialien, weit verbreitet in der Elektronikindustrie	Lot benötigt, Verschmutzung, arbeitsintensiv (Automatisierung), thermischer Eintrag herausfordernd [17]

Tab. 2 Übersicht über einige mögliche Fügeverfahren, die zur Batterie-Verschaltung genutzt werden können. Nach [2, 7, 9, 11, 17].

Laserstrahlschweißen

Beim Laserstrahlschweißen wird ein fokussierter Laserstrahl genutzt, um die zu fügenden Metalle lokal aufzuschmelzen. Durch die hohe Energiedichte im Fokuspunkt können tiefe und lokal stark begrenzte Schweißungen mit hoher Vorschubgeschwindigkeit realisiert werden [2]. Es lassen sich verhältnismäßig geringe Kontaktwiderstände realisieren (vgl. Abb. 4). Der Wärmeeintrag in die Batteriezelle selbst ist gering [9]. Durch die Überlagerung der Vorschubrichtung mit einer oszillierenden Bewegung des Laserstrahls kann zudem die Eindringtiefe des Laserstrahls kontrolliert und Schäden an den Batteriezellen vermieden werden [11]. Mit dieser als *laser micro welding* bezeichneten Technik lassen sich hohe mechanische Festigkeiten erzielen [9, 18]. Daneben ist die gute Automatisierbarkeit ein großer Vorteil. Herausfordernd beim Laserstrahlschweißen sind Materialien, die die Laserstrahlung reflektieren und sich somit schwer erhitzen lassen. Daneben ist die benötigte präzise Ausrichtung der Fügeteile ein Nachteil, der die Flexibilität einschränkt [11]. Das sogenannte Laserbonden kann hier Abhilfe schaffen, indem es die Flexibilität des Ribbon-Bondens mit den genannten Vorteilen des Laserstrahlschweißens verbindet [19, 20]. Ebenfalls nicht trivial sind die Prozessstabilität und Qualitätskontrolle beim Laserstrahlschweißen [11, 14].

Schrauben

Beim Schrauben werden die Terminals bzw. Tabs der Zellen mit den Zellverbindern über Schraubverbindungen zusammengeklemt. Schraubverbindungen können sehr einfach wieder gelöst werden. Dadurch ist die Demontage von Batteriemodulen entweder für die Reparatur oder die Weiterverwendung einzelner Zellen (*2nd life*) sowie für das Recycling sehr leicht umsetzbar [11]. Das Erreichen niedriger Kontaktwiderstände hängt stark vom Material (spezifischer Widerstand und geringe Härte) und dem Druck ab, mit dem Zellverbinder und Terminal zusammengepresst werden; die Oberflächenrauheit hat einen geringeren Einfluss [11, 16]. Bei einem Anpressdruck von $0,63 \text{ N mm}^{-2}$ und großen Kontaktflächen lassen sich sehr niedrige Kontaktwiderstände erreichen (vgl. Abb. 4) [17]. Der Einfluss von Oxid- oder Schmutzschichten ist hingegen sehr groß. Beim Verschrauben wird keine Wärme in die Batteriezellen eingebracht. Durch Vibrationen können sich Schraubverbindungen allerdings mit der Zeit lösen und die entsprechenden Kontaktwiderstände erhöhen [11]. Bei mobilen Anwendungen kann das zusätzliche Gewicht der Schraubverbindungen ein Nachteil sein. Das Verschrauben ist aufgrund der meist manuellen Ausführung lediglich bei kleinen Stückzahlen in der Batteriepackfertigung, ein kosteneffizienter Prozess [14].

Ultraschallschweißen

Beim Ultraschallschweißen werden die zu fügenden Bauteile typischerweise zwischen der sog. Sonotrode und dem Amboss eingeklemmt. Beim Verschalten von Batterien vibriert die Sonotrode im Ultraschallfrequenzbereich parallel zur Kontaktfläche zwischen Batterieterminal und Zellverbinder [9, 21]. Durch die Vibration werden Oxidschichten und Verunreinigungen an der Grenzfläche aufgebrochen bis reines Metall auf Metall liegt. Die unebenen Oberflächen der Fügepartner werden gegeneinander bewegt und plastisch verformt. Durch die auftretenden Scherkräfte erwärmen sich die zu fügenden Bauteile, aber werden nicht aufgeschmolzen [2, 9, 21]. So können intermetallische Phasen bei der Herstellung vermieden werden [22]. Die resultierenden elektrischen Kontaktwiderstände zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Größe der Schweißfläche und sind vergleichsweise groß (vgl. Abb. 4) [9]. Die Temperaturen beim

Fügeprozess liegen einerseits unter den Schmelzpunkten der Metalle [2]. Andererseits gibt es Hinweise darauf, dass der Temperatureintrag in die Batteriezellen vergleichsweise hoch ist, aber von den gewählten Parametern abhängt [9, 11]. Des Weiteren können die Vibrationen das Innere der Batterien schädigen [2, 11]. Die Anforderungen an die Oberflächen der Fügepartner sind groß bzw. die Oberflächenbeschaffenheit hat einen großen Einfluss [11].

Widerstandsschweißen

Beim Widerstandsschweißen werden Zellterminal und Zellverbinder je nach Zelltechnologie zweiseitig durch sich gegenüberliegende Schweißelektroden oder einseitig durch nebeneinanderliegende Schweißelektroden aufeinandergespresst (Abb. 3 a, b) [11]. Der Schweißstrom fließt von der einen Schweißelektrode durch die Fügeteile hindurch zur anderen Schweißelektrode. Aufgrund des elektrischen Widerstands an der Grenzfläche zwischen den Fügeteilen erhitzt der hohe Strom diese punktuell und die Materialien verschmelzen [2]. Sinnvoll ist es, einen Zweipuls-Prozess zu verwenden. Der erste Strompuls löst die Oxide und Verunreinigungen an der Grenzfläche der Materialien und der zweite Impuls wird zum Schweißen der Werkstücke verwendet [9]. Aus diesem Wirkprinzip ergibt sich die Herausforderung Metalle mit hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit zu fügen. Besonders bei einseitiger Anordnung der Schweißelektroden führt die hohe Leitfähigkeit (z. B. Kupfer, Nickel oder Aluminium) zu einem parasitären Stromfluss innerhalb des Zellverbinders gemäß dem geringsten Widerstand. Das Buckelschweißen und speziell geformte Zellverbinder schaffen hier Abhilfe [2, 5]. Die Zellverbinder haben eingeprägte Buckel, die beim Zusammenpressen alleinigen Kontakt mit dem Zellterminal ausbilden. Beim Buckelschweißen wird daher der Schweißstrom durch die Buckel eingeschnürt – die Erhitzung wird stärker lokalisiert (Abb. 3 c). Um den parasitären Stromfluss in der Ebene der Zellverbinder zu vermeiden, werden die Zellverbinder zwischen den Aufsetzpunkten der Schweißelektroden ausgespart, sodass sich der Widerstand entsprechend erhöht (Abb. 3 d). Des Weiteren ist es herausfordernd artverschiedene Metalle mit unterschiedlichen Schmelzpunkten zu schweißen [2]. Abhilfe schaffen hier beschichtete Metalle (siehe Abschnitt Fügestellen) [23]. Ebenfalls herausfordernd ist die Anhaftung der Schweißelektroden an den Zellverbindern. Diese tritt aufgrund des parasitären Stromflusses auf, wenn der Widerstand zwischen Schweißelektrode und Zellverbinder zu groß ist [2, 9]. Ein hoher Verschleiß der Schweißelektroden ist die Folge. Daher ist die richtige Wahl der Parameter essentiell für die Qualität der Schweißung, zum Beispiel die Schweißenergie [5, 9, 24]. Bei zu niedriger oder zu hoher Schweißenergie resultieren sehr hohe elektrische Kontaktwiderstände, geringe mechanische Festigkeit oder es kommt mit dem Auswurf von Schweißgut zu Hohlräumen in der Fügestelle [9]. Insbesondere der Schweißstrom beeinflusst die Größe der Schweißverbindung, die sog. Schweißlinse, und die mechanischen Eigenschaften [24, 25]. Mit zunehmendem Schweißstrom nehmen die Eigenspannungen in der Schweißlinse zu [25]. Bei guten Schweißungen ist der elektrische Kontaktwiderstand gering; und hängt von der Größe der Kontaktfläche, d. h. der Anzahl der Schweißpunkte pro Verbindung ab (vgl. Abb. 4). Der thermische Eintrag in die Batterie ist geringer als beim Laserstrahl- und Ultraschallschweißen und unkritisch, weil sich die Hitze in den Schweißlinsen konzentriert [9]. Ein weiterer Vorteil des Widerstandsschweißens sind die geringen Kosten aufgrund der benötigten Infrastruktur [5]. Es werden keine Zusatzwerkstoffe oder -gase benötigt [11]. Nicht zu unterschätzen sind die effiziente und sehr gute Automatisierbarkeit des Widerstandsschweißprozesses sowie die etablierten Möglichkeiten zur Kontrolle der Schweißqualität [11].

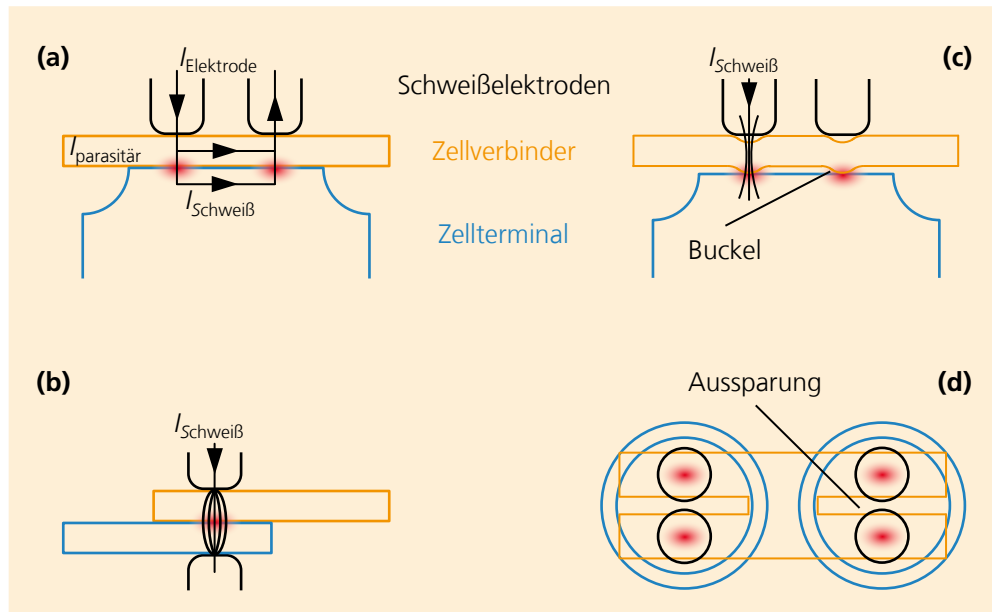


Abb. 3 Verschiedene Varianten des Widerstandsschweißverfahrens. (a) zeigt den einseitigen Schweißprozess mit zwei nebeneinanderliegenden Schweißelektroden. (b) zeigt den zweiseitigen Prozess. In (c) ist schematisch das Buckelschweißen, eine Variante des Widerstandsschweißens für hoch-leitfähige Metalle und in (d) speziell geformte Zellverbinder (H-Layout) gezeigt. Durch die H-Struktur vergrößert sich der elektrische Widerstand innerhalb des Zellverbinders. Nach [2, 5, 9].

© Fraunhofer ISE

Weichlöten

Das Weichlöten ist für das Fügen von Batterieverbindungen noch nicht etabliert, wird aber in der Elektronikindustrie häufig eingesetzt. Es existieren viele Freiheitsgrade (Lot, Flussmittel, Aufschmelzverfahren), um Lithium-Ionen-Batterien mit einem geringen Wärmeeintrag, geringen elektrischen Kontaktwiderständen und einer hohen mechanischen Festigkeit zu verbinden [17]. Geringe Temperaturen lassen sich beim Löten erreichen, weil nur die Liquidustemperatur des Lots und nicht die Schmelztemperaturen der Fügepartner (z. B. Batteriezellverbinder und Batteriezellgehäuse) erreicht werden müssen. In einem Vergleich mit Presskontakierung, Laserschweißen, Ultraschallschweißen und Widerstandsschweißen wurden die geringsten Kontaktwiderstände mithilfe des Weichlöten erzielt (siehe Abb. 04). Erste Lötversuche wurden bisher jedoch nur mit vernickeltem Stahl und Messing durchgeführt [11]. Von einer automatisierten Serienfertigung ist das Weichlöten zur Kontaktierung von Batterien jedoch noch entfernt.

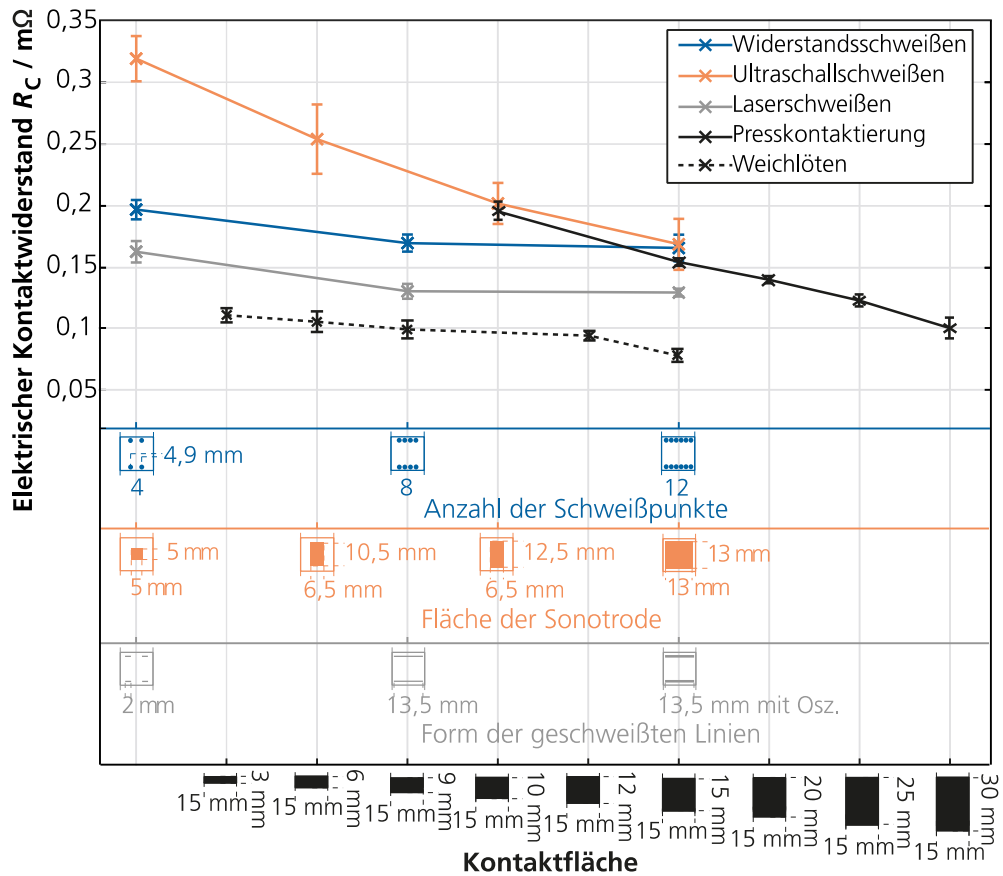


Abb. 4 Die Grafik vergleicht verschiedene Fügeverfahren, mit denen Messingproben verbunden wurden, anhand resultierender elektrischer Kontaktwiderstände mit 90%-Konfidenzintervall in Abhängigkeit von der Kontaktfläche. Adaptiert nach freundlicher Bereitstellung durch M. J. Brand [17].

© Fraunhofer ISE

Marktsituation

Die Marktsituation im deutschsprachigen Raum wurde anhand einer Umfrage bei Marktteilnehmern im Sommer 2020 und Winter 2020/21 evaluiert. Um eine Übersicht über die tatsächlich genutzten Technologien zu erhalten, wurden die verwendeten Fügeverfahren, Zellverbindermaterialien und Zelltypen abgefragt. An der Umfrage beteiligten sich 11 Firmen (Automobilhersteller ausgenommen), der Rücklauf lag bei 55 %. Die Befragung enthielt die vier folgenden Fragen, bei denen Mehrfachnennungen zulässig waren:

- Welche Batteriezelltypen verwenden Sie für Ihre Batteriepacks?
- Welche Verbindungstechnologie kommt für die jeweiligen Zelltypen zum Einsatz?
- Welches Material setzen Sie als Zellerbinder für die Verschaltung ein?
- Benutzen Sie unterschiedliche Verbindermaterialien für unterschiedliche Zelltypen? Wenn ja, welche

Ergebnisse Frage 1: Welche Batteriezelltypen verwenden Sie für Ihre Batteriepacks

Die Umfrageergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Zur Herstellung von Batteriepacks werden etwa zu zwei Dritteln zylindrische Lithium-Ionen-Batteriezellen eingesetzt. Die Bauformen 18650, 21700 und 26650 werden dabei zu etwa gleichen Teilen genutzt. Weniger verbreitet sind prismatische Zellen mit 16 %, während Pouchzellen nur zu gut 6 % Verwendung finden. Hinter den sonstigen eingesetzten Zelltypen verbergen sich Nickel-Metallhydrid- sowie auch noch Nickel-Cadmium-Akkumulatoren. In welcher Bauform diese eingesetzt werden, geht aus den Umfrageantworten nicht hervor. Bemerkenswert ist jedoch, dass es fast ausschließlich Mehrfachnennungen gab (91 %). Das bedeutet, viele Hersteller von Batteriepacks verschalten verschiedene Bauformen und sind nicht auf ausschließlich einen Zelltyp spezialisiert.

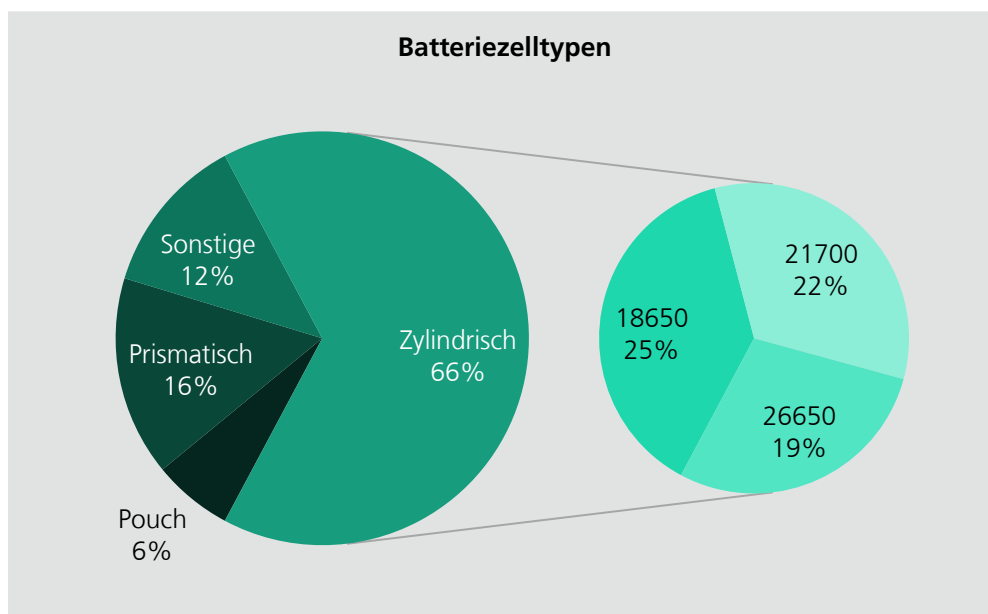


Abb. 5 Darstellung der verwendeten Lithium-Ionen-Batteriezelltypen. Häufig verwendet werden zylindrische Zellen. Zu jeweils etwa gleichen Teilen werden die Bauformen 18650, 21700, 26650.

© Fraunhofer ISE

Ergebnisse Frage 2: Welche Verbindungstechnologie kommt für die jeweiligen Zelltypen zum Einsatz?

Marktsituation

Die Auswertung der zweiten Frage ist in Abbildung 6 visualisiert. Mit 57 % ist die häufigste eingesetzte Technologie zum Verbinden von Zellverbindern und Batteriterminals eine Form des Widerstandsschweißens. Welche Ausführung im Einzelnen eingesetzt wird, bleibt zum Teil unklar: 21 % der Angaben sind ohne Spezifizierung. Die übrigen 36 % der Antworten setzen sich aus 29 % Punktschweißen und 7 % Buckelschweißen zusammen. Wie viele Batteriemodule tatsächlich mit einem Widerstandsschweißverfahren hergestellt werden, lässt sich nicht ableiten. Bemerkenswert ist hingegen, dass acht der elf Firmen eine Form des Widerstandsschweißens einsetzen. Mit 29 % ist die zweithäufigste eingesetzte Technologie das Laserschweißen. Vor allem größere Firmen nutzen dieses Verfahren für die Verschaltung von Batteriezellen. Die relativ hohen Investitionskosten könnten ein Grund dafür sein. Im Gegensatz zur ersten Frage gab es hier nur wenige Mehrfachnennungen. Lediglich zwei Firmen nutzen verschiedene Fügeverfahren. Das bedeutet im Umkehrschluss den flexiblen Einsatz der Widerstandsschweißtechnologie in Bezug auf die Batteriezelltypen. Mit Widerstandsschweißverfahren werden zylindrische, prismatische Zellen (und sonstige) verschaltet. Was jedoch nicht bedeutet, dass zylindrische Zellen nur mit Widerstandsschweißen verschaltet werden. Ebenso kommt das Laserschweißen zum Einsatz. Pouchzellen werden sowohl mit dem Laser- als auch dem Ultraschallschweißen verbunden. Nach Ergebnissen dieser Umfrage findet das Verschrauben von Zellverbindern und Batteriterminals aktuell nur bei prismatischen Zellen Verwendung.

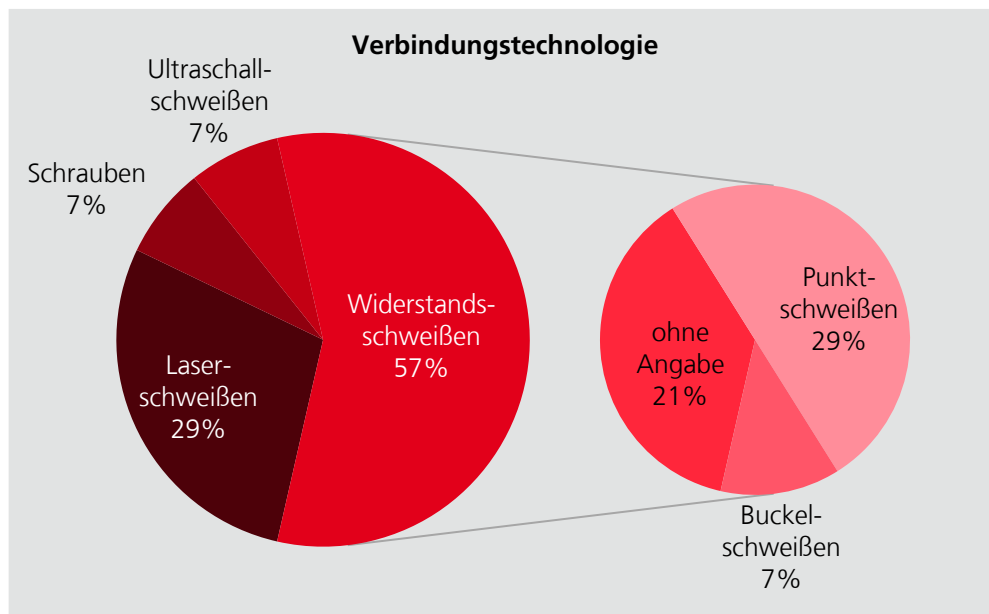


Abb. 6 Umfrageergebnis der Frage nach eingesetzten Verbindungstechnologien bei der Herstellung von Batteriemodulen bzw. -packs. Widerstandsschweißen ist die häufigste eingesetzte Technologie.

© Fraunhofer ISE

Ergebnisse Frage 3: Welches Material setzen Sie als Zellverbinder für die Verschaltung ein?

Die Aussagen zur dritten Frage sind in Abbildung 7 zusammengefasst. Ein viel verwendetes Material ist Hilumin, also vernickelter Stahl. Mit 20 % bzw. 15 % rangieren Kupfer und Nickel dahinter, gefolgt von Aluminium. Die übrigen 15 % setzen sich wieder

rum zu gleichen Anteilen aus Bronze und Stahl, sowie einem plattierten Verbundwerkstoff bestehend aus Kupfer, Edelstahl und Nickel zusammen. 55 % der Firmen nutzen nur ein Zellverbindermaterial, während 45 % mehr als ein Zellverbindermaterial verwenden. Vier Firmen nutzen ausschließlich Hilumin zur Verbindung von Batteriezellen.

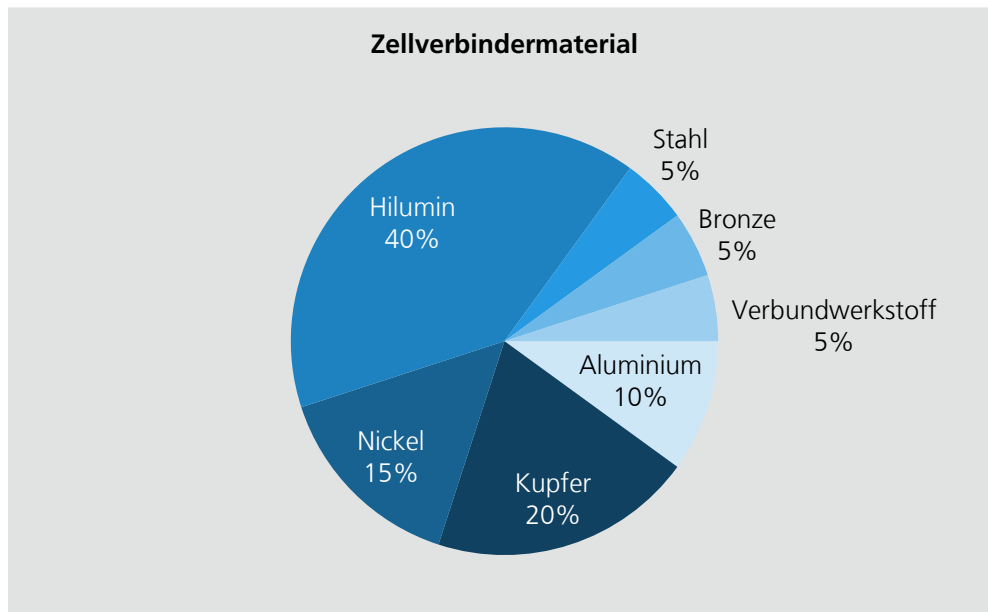


Abb. 7 Darstellung der verschiedenen Zellverbindermaterialien, die zur Verschaltung von Batteriezellen eingesetzt werden. Das in großem Maßstab hergestellte Hilumin (vernickelter Stahl) wurde mit 40 % am häufigsten genannt.

© Fraunhofer ISE

Ergebnisse Frage 4: Benutzen Sie unterschiedliche Verbindermaterialien für unterschiedliche Zelltypen? Wenn ja, welche?

Obwohl nur 27 % der Firmen aussagten, unterschiedliche Zellverbinder für unterschiedliche Zelltypen einzusetzen (siehe Abb. 8), lässt sich zumindest die spezifische Verwendung von Aluminium dem prismatischen Zelltyp zuordnen. Kupfer wird für alle Bauformen zylindrischer Zellen und für prismatische Zellen eingesetzt. Das gleiche trifft auf Nickel zu. Kupfer wird zusätzlich auch für Pouchzellen verwendet, während Nickel auch für Nickel-Metallhydrid- und Nickel-Cadmium-Akkumulatoren eingesetzt wird. Im Gegensatz dazu wird Hilumin sowohl für zylindrische Zellen, zum Teil auch für prismatische Zellen und Pouchzellen, als auch für Nicht-Lithium-Ionen-Zellen verwendet. Insgesamt ist die Verwendung spezieller Zellverbindermaterialien weniger an den Zelltyp gekoppelt als vielmehr an die zu tragenden Ströme. Aus den vorliegenden Daten lässt sich weiterhin schließen, dass es kein Zellverbindermaterial gibt, das ausschließlich mit einem speziellen Fügeverfahren verarbeitet wird. Aluminiumzellverbinder werden geschraubt oder mit einem Widerstandsschweißverfahren bzw. mit Laserschweißen verbunden. Zellverbinder aus Kupfer und Nickel sowie Bronze und Stahl werden mit den zwei letztgenannten Verfahren an Batterieterminals geschweißt. Hilumin wird zusätzlich auch im Ultraschallschweißverfahren mit den Kontakten von Pouchzellen verbunden. Nach Datenlage wird der plattierte Verbundwerkstoff aus Kupfer, Edelstahl und Nickel aktuell nur mit Laserschweißen verarbeitet. Eine allgemeingültige Ausschließlichkeit dieser Kombination ist jedoch nicht ableitbar.

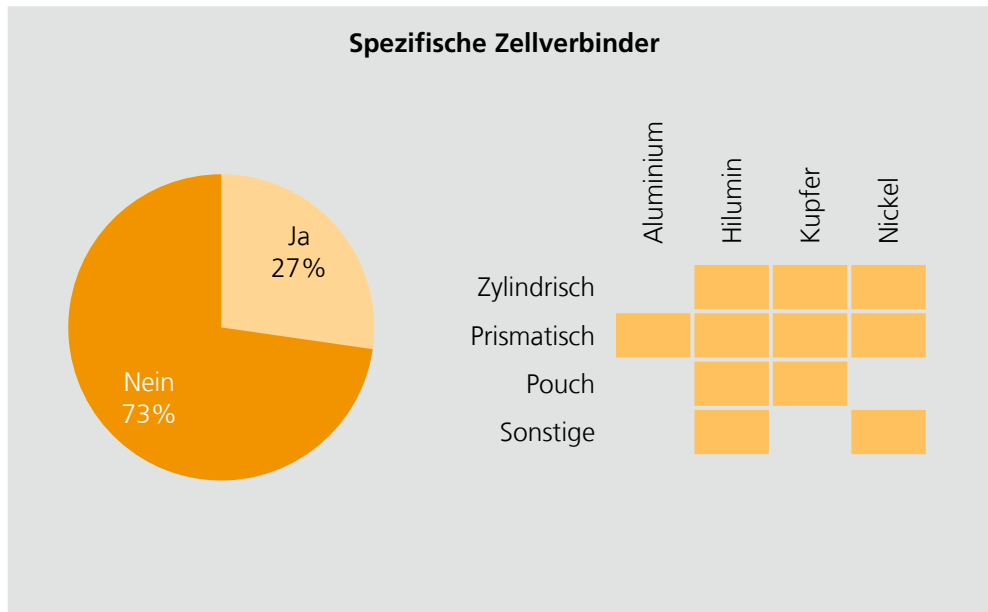


Abb. 8 Ergebnis der Abfrage nach der Verwendung spezifischer Zellverbinder für unterschiedliche Batteriezelltypen. Nicht viele Firmen verwenden unterschiedliche Materialien für unterschiedliche Zelltypen. Hilumin wird für alle Batteriezelltypen eingesetzt

© Fraunhofer ISE

Produktion und Entwicklungspotential

Im Frühling 2021 wurde eine weitere Umfrage unter Marktteilnehmern durchgeführt. Um eine Übersicht über die Produktion und die Entwicklung des Marktes zu erhalten, wurden die Stückzahlen der Batteriemodule, die Anwendungsgebiete, die Auslastung der Produktion und die Zukunftsaussichten abgefragt. An der Umfrage beteiligten sich 6 Firmen, der Rücklauf lag bei rund 32 %. Die Befragung enthielt die fünf folgenden Fragen:

- Produzieren Sie unterschiedliche Batteriemodulgrößen? Wenn ja, wie viele?
- Für wie viele verschiedene Anwendungsgebiete produzieren Sie Batteriemodule?
- Wie viele Verschaltungsanlagen setzen Sie in der Produktion ein?
- Wie stark ausgelastet war Ihre Batteriemodulfertigung in den letzten drei Monaten?
- Planen Sie Ihre Batteriemodulfertigungskapazität in den nächsten zwei Jahren auszubauen?

Ergebnisse Frage 5: Produzieren Sie unterschiedliche Batteriemodulgrößen? Wenn ja, wie viele?

Alle befragten Batteriemodulproduzenten gaben an, verschiedene Modulgrößen zu produzieren oder produziert zu haben. Die rückgemeldete Anzahl unterschiedlicher Batteriemodulgrößen schwankt dabei allerdings stark. Rund 20 % der Hersteller produzieren bis zu 10 unterschiedliche Modulvarianten. Die meisten Hersteller (40 %) haben 11 bis 50 verschiedene Batteriemodule im Angebot. Jeweils 20 % der Firmen stellen zwischen 51 und 100 unterschiedliche Modulgrößen her oder haben deutlich mehr als 100 Produkte im Portfolio. Die Produktvielfalt korreliert dabei nicht zwingend mit der Größe der Firmen gemessen an der Zahl der Mitarbeiter*innen.

Ergebnisse Frage 6: Für wie viele verschiedene Anwendungsgebiete produzieren Sie Batteriemodule?

Marktsituation

Jeweils gut 33 % der befragten Firmen gaben an, Batteriemodule für 1 bis 4 sowie 5 bis 10 Anwendungsgebiete herzustellen. Die übrigen 33 % gaben an, ihre Batteriemodule kommen in mehr als 10 Anwendungsgebieten zum Einsatz. Das bedeutet, von Spezialanwendungen bis hin zu diversen Anwendungen, Modulhersteller bedienen wenige oder sehr viele Segmente des Marktes. Aus den Antworten zu Frage 5 und Frage 6 lässt sich kein eindeutiger Trend ableiten bezüglich der Frage, ob diejenigen Hersteller, die viele unterschiedliche Größen produzieren, ihre Module auch für viele unterschiedliche Anwendungsgebiete herstellen. Teilweise gibt es von den Herstellern bestimmte Modulgrößen für ein Anwendungsgebiet, teilweise gibt es sehr viele unterschiedliche Modulgrößen für wenige Anwendungsgebiete. Das Bild ist insgesamt sehr heterogen. Auch ist der Begriff »Anwendungsgebiet« nicht uneindeutig definiert, so dass unterschiedliche Interpretationen nicht auszuschließen sind. Allerdings ist die Anzahl der unterschiedlichen Anwendungsgebiete, für die Batteriemodule hergestellt werden, deutlich geringer als die Variantenvielfalt der Batteriemodulgrößen.

Ergebnisse Frage 7: Wie viele Verschaltungsanlagen setzen Sie in der Produktion ein?

Aus den Antworten zu dieser Frage ist ersichtlich, dass auch die Anzahl der eingesetzten Anlagen zur Verschaltung von Batteriezellen stark schwankt. Demnach werden Batteriemodule sowohl in automatischen Schweißanlagen als auch in manuellen Fertigungslinien hergestellt. Die Anzahl der Verschaltungsanlagen korreliert nicht mit der Modulgrößenvielfalt oder der Vielfalt der Anwendungsgebiete. Vielmehr gibt es Hinweise darauf, dass eine große Produktvielfalt (viele Batteriemodulgrößen und Anwendungsgebiete) durch eine manuelle Produktion erreicht wird. Auf der anderen Seite eignen sich automatische Anlagen besonders für große Stückzahlen. Diese lassen sich unter anderem dann gut erreichen, wenn die Produktvielfalt begrenzt ist. Für die Ableitung eines eindeutigen Trends ist die Datenlage jedoch nicht ausreichend.

Ergebnisse Frage 8: Wie stark ausgelastet war Ihre Batteriemodulfertigung in den letzten drei Monaten?

Marktsituation

Die Aussagen zur achten Frage sind in Abbildung 9 zusammengefasst. Alle Fertigungslinien der Hersteller waren in den vergangenen drei Monaten (Februar bis April 2021) zu mindestens 51 % ausgelastet. Bei der überwiegenden Mehrheit der Firmen (60 %) betrug die Auslastung der Batteriemodulfertigungskapazität zwischen 86 und 100 %. Jeweils 20 % der Batteriemodulhersteller gaben an, ihre Produktion sei zu 51...70 % bzw. 71...85 % ausgelastet (siehe Abb. 9). Nach den Rückmeldungen, ist ein Grund für die geringeren Auslastungen der Fertigungslinien in der COVID-19-Pandemie zu finden.

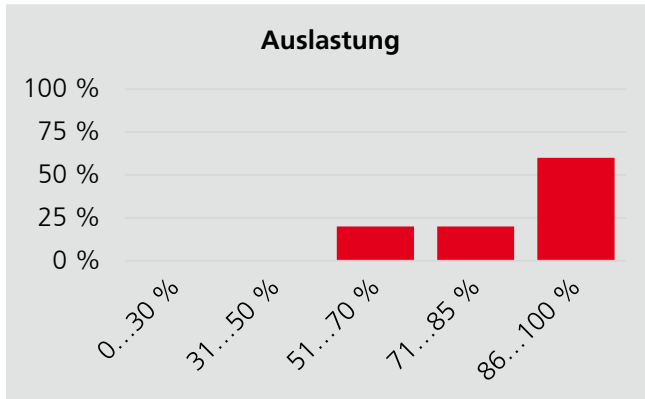


Abb. 9 Auslastung der Modulfertigung der Produzenten. Auf der horizontalen Achse ist die Auslastung der Produktion in % aufgetragen. Die vertikale Achse zeigt den Anteil der Firmen, die die entsprechende Auslastung angegeben haben. (c) Fraunhofer ISE

Ergebnisse Frage 9: Planen Sie Ihre Batteriemodulfertigungskapazität in den nächsten zwei Jahren auszubauen?

Ungeachtet der Pandemie ist der Optimismus bei den Batteriemodulherstellern uneingeschränkt. Alle Firmen, die auf die Umfrage reagiert haben, blicken der Zukunft positiv entgegen und planen, die eigenen Fertigungskapazitäten innerhalb der nächsten zwei Jahre auszubauen (siehe Abb. 10). Gründe sind sowohl die hohe Auslastung der bisherigen Fertigungskapazitäten sowie volle Auftragsbücher als auch der einheitliche Wunsch, zu expandieren und mehr Fertigungskapazitäten zu schaffen. Zusammengefasst sind die gegebenen Antworten auf diese beiden Fragen ein eindeutiger Hinweis auf einen stark wachsenden Markt der Batterieverschlaltung. Dieser Trend fügt sich in den Hintergrund der Energiewende, der Elektrifizierung des Verkehrssektors und des wachsenden Bereichs der Anwendungen, die portable Energie benötigen, ein.

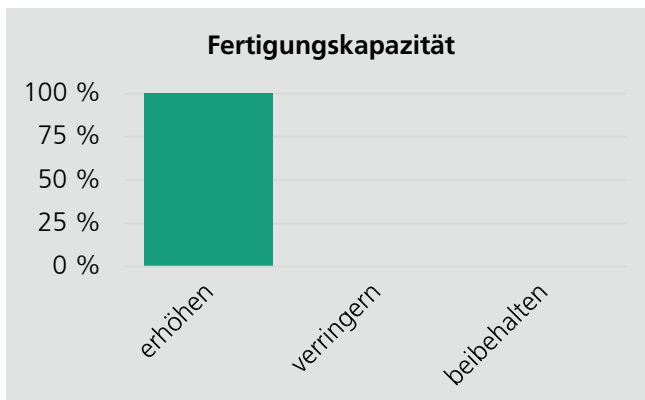


Abb. 10 Zukunftsaussichten der Batteriemodulproduzenten. Unter den antwortenden Firmen herrscht Konsens darüber, die eigenen Fertigungskapazitäten zu auszubauen. (c) Fraunhofer ISE

Fazit

Aufgrund der Komplexität von Batteriezellen ist die Herstellung von Batteriemodulen und Batteriepacks eine interdisziplinäre Aufgabe mit multiphysikalischen Herausforderungen. Im Fokus des Reports stehen die elektrischen Kontaktwiderstände als kritische Parameter der Verschaltung. Dem Idealfall von vernachlässigbar kleinen und identischen Kontaktwiderständen kann man sich durch eine sorgfältige Auswahl der Verbindungsmaterialien und Verschaltungsprozesse annähern. Dazu sind sehr gleichmäßige Fügestellen mit ausreichenden Haftkräften und möglichst identischen niedrigen elektrischen Kontaktwiderständen Voraussetzung. Die Zellverbinder sollten eine möglichst hohe elektrische Leitfähigkeit aufweisen, um den elektrischen Widerstand zwischen den Batteriezellen im Modul oder Pack gering zu halten und den Strom möglichst homogen auf die einzelnen Batteriezellen zu verteilen. Die Eignung eines Fügeverfahrens zur Herstellung von elektrischen Batterieverbindungen, die Anforderungen an die Fügestellen und das Bauteil im Betrieb lassen sich in vier Kategorien zusammenfassen [2, 11]:

Elektrische und thermische Anforderungen

- Fügestellen mit möglichst identischen, möglichst geringen elektrischen Kontaktwiderständen
- Möglichst geringer Eintrag thermischer Energie während des Fügeprozesse
- Fügestellen mit einer hohen thermischen Ermüdungsbeständigkeit

Material- und metallurgische Anforderungen

- Geringes Korrosionsrisiko der Fügestelle
- Fügen von ungleichen Materialien
- Flexibilität für eine Vielzahl von Oberflächenbedingungen und Materialien

Mechanische Anforderungen

- Hohe Stabilität gegenüber auftretenden Kräften
- Gute Ermüdungs- und Kriechfestigkeit aufgrund betriebsbedingter zyklischer Belastungen
- Geringer Eintrag von (thermo-)mechanischen Spannungen durch das Fügen
- Vermeiden von mechanischen Schäden und Schwingungsschäden an den Batterien und Verbindern beim Fügen

Ökonomische Anforderungen

- Eignung für die Massenproduktion (hoher Durchsatz und hoher Automatisierungsgrad)
- Geringe Anschaffungskosten
- Möglichkeit zur Stabilisierung und Standardisierung des Fügeprozesses

Literaturverzeichnis

- [1] P. Sterchele *et al.*, «Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen,» Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg im Breisgau, Feb. 2020. Accessed: Sep. 16 2020. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>
- [2] A. Das, D. Li, D. Williams, and D. Greenwood, «Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing,» *WEVJ*, vol. 9, no. 2, p. 22, 2018, doi: 10.3390/wevj9020022.
- [3] G.-H. Kim, K. Smith, J. Ireland, and A. Pesaran, «Fail-safe design for large capacity lithium-ion battery systems,» *Journal of Power Sources*, vol. 210, pp. 243–253, 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.03.015.
- [4] S. Michaelis *et al.*, «Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030: Update 2018,» Frankfurt am Main, Batterieproduktion, 2018. Accessed: May 6 2019.
- [5] M. Masomtob, R. Sukondhasingha, J. Becker, and D. U. Sauer, «Parametric Study of Spot Welding between Li-ion Battery Cells and Sheet Metal Connectors,» *EJ*, vol. 21, no. 7, pp. 457–473, 2017, doi: 10.4186/ej.2017.21.7.457.
- [6] B. Mehlmann, A. Olowinsky, M. Thuilot, and A. Gillner, «Spatially Modulated Laser Beam Micro Welding of CuSn6 and Nickel-plated DC04 Steel for Battery Applications,» *JLMN*, vol. 9, no. 3, pp. 276–281, 2014, doi: 10.2961/jlmn.2014.03.0019.
- [7] E. Maiser, S. Michaelis, A. Kampker, H. Heimes, C. Deutskens, and M. Ordnung, «Montageprozess eines Batteriepacks,» Frankfurt am Main, Aachen, Batterieproduktion, 2015. Accessed: May 6 2019.
- [8] B. Wu, V. Yufit, M. Marinescu, G. J. Offer, R. F. Martinez-Botas, and N. P. Brandon, «Coupled thermal–electrochemical modelling of uneven heat generation in lithium-ion battery packs,» *Journal of Power Sources*, vol. 243, pp. 544–554, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.164.
- [9] M. J. Brand, P. A. Schmidt, M. F. Zaeh, and A. Jossen, «Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances,» *Journal of Energy Storage*, vol. 1, pp. 7–14, 2015, doi: 10.1016/j.est.2015.04.001.
- [10] T. Bruen and J. Marco, «Modelling and experimental evaluation of parallel connected lithium ion cells for an electric vehicle battery system,» *Journal of Power Sources*, vol. 310, pp. 91–101, 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.01.001.
- [11] M. Zwicker, M. Moghadam, W. Zhang, and C. V. Nielsen, «Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining,» *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 1, p. 100017, 2020, doi: 10.1016/j.jajp.2020.100017.
- [12] David R. Lide (ed.), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005.
- [13] G. Schulze, *Die Metallurgie des Schweißens*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [14] P. A. Schmidt, «Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen,» Dissertation, Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, München, 2015. Accessed: Feb. 5 2019.
- [15] M. Vlad, «Ultrasonic welding of aluminum: a practical study in consistency, part marking and control modes,» Dissertation, Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa State University, 2007.
- [16] C. Bolsinger, M. Zorn, and K. P. Birke, «Electrical contact resistance measurements of clamped battery cell connectors for cylindrical 18650 battery cells,» *Journal of Energy Storage*, vol. 12, pp. 29–36, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.04.001.

- [17] M. J. Brand, E. I. Kolp, P. Berg, T. Bach, P. Schmidt, and A. Jossen, «Electrical resistances of soldered battery cell connections,» *Journal of Energy Storage*, vol. 12, pp. 45–54, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.03.019.
- [18] B. Mehlmann, E. Gehlen, A. Olowinsky, and A. Gillner, «Laser Micro Welding for Ribbon Bonding,» *Physics Procedia*, vol. 56, pp. 776–781, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.085.
- [19] J. Helm, I. Dietz von Bayer, A. Olowinsky, and A. Gillner, «Influence of the surface properties of the connector material on the reliable and reproducible contacting of battery cells with a laser beam welding process,» *Weld World*, vol. 63, no. 5, pp. 1221–1228, 2019, doi: 10.1007/s40194-019-00727-y.
- [20] J. Sedlmair, B. Mehlmann, and A. Olowinsky, «Laserbonding instead of ultrasonic wire bonding - An alternative joining technology for power applications,» in *2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP): Venue: Takinoyu Hotel, Tendo, Yamagata, Japan, dates: April 19 (Wed.)-22 (Sat.)*, Yamagata, Japan, 2017, pp. 94–96. Accessed: Aug. 20 2019.
- [21] S. Elangovan, S. Semeer, and K. Prakasan, «Temperature and stress distribution in ultrasonic metal welding—An FEA-based study,» *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 3, pp. 1143–1150, 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.032.
- [22] S. Shawn Lee, T. Hyung Kim, S. Jack Hu, W. W. Cai, J. A. Abell, and J. Li, «Characterization of Joint Quality in Ultrasonic Welding of Battery Tabs,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 135, no. 2, p. 541, 2013, doi: 10.1115/1.4023364.
- [23] A. Das, D. Li, D. Williams, and D. Greenwood, «Weldability and shear strength feasibility study for automotive electric vehicle battery tab interconnects,» *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 1, p. 697, 2019, doi: 10.1007/s40430-018-1542-5.
- [24] R. S. Florea, D. J. Bammann, A. Yeldell, K. N. Solanki, and Y. Hammi, «Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy,» *Materials & Design*, vol. 45, pp. 456–465, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.08.053.
- [25] H. Moshayedi and I. Sattari-Far, «Resistance spot welding and the effects of welding time and current on residual stresses,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 11, pp. 2545–2552, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.008.

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

Ansprechpartner

Christian H. Schiller, Achim Kraft
christian.schiller@ise.fraunhofer.de
Tel.: +49 761 4588-2198

Bereichsleiter Photovoltaische Module und Kraftwerke

Dr. Harry Wirth

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
www.ise.fraunhofer.de

Institutsleitung

Prof. Dr. Hans-Martin Henning
Prof. Dr. Andreas Bett

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages