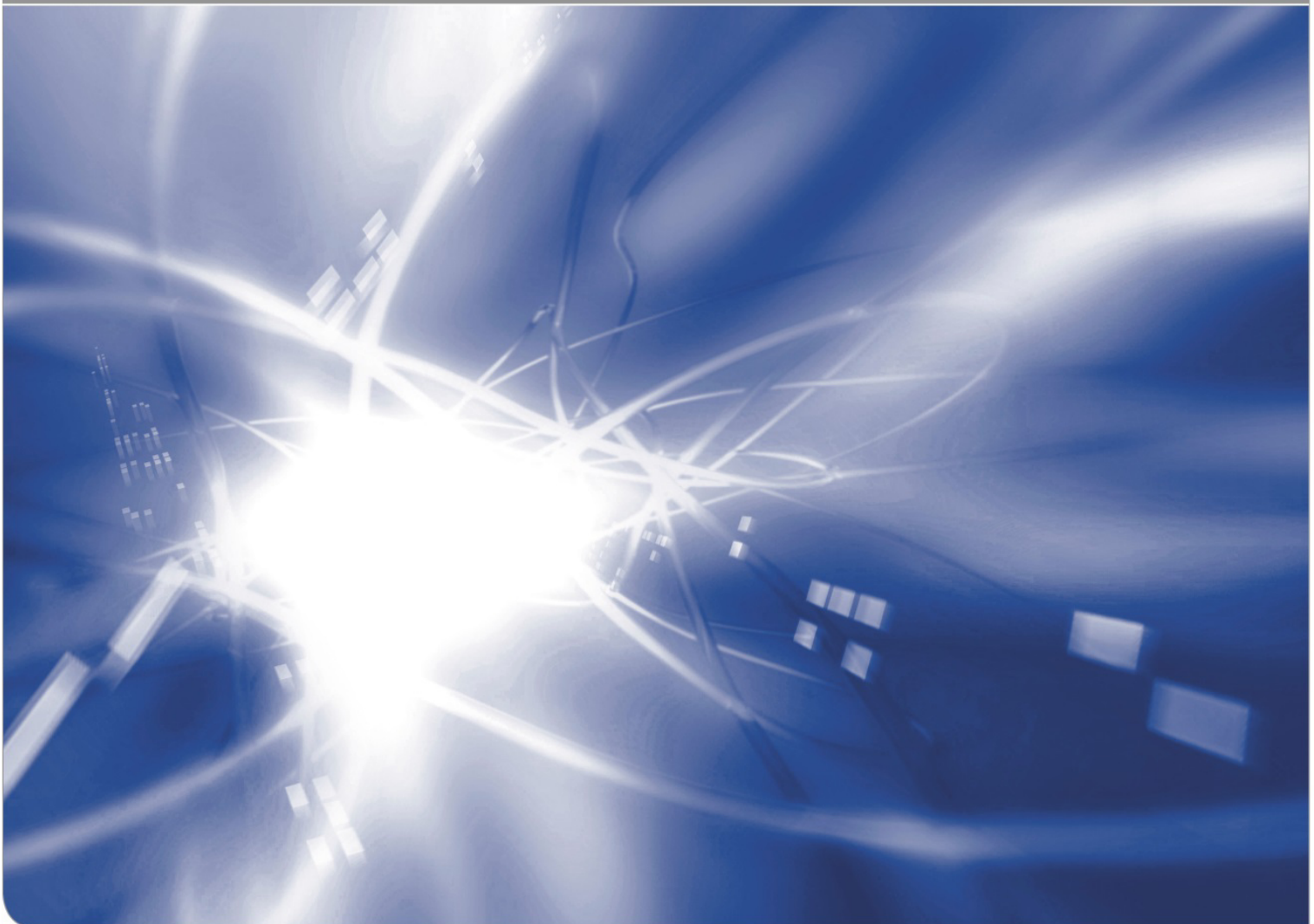


Konzeptionierung einer lösbaren Zellkontaktierung für Akku-Packs zur Erhöhung der Demontage- und Recyclingfreundlichkeit

von Philip Müller-Welt¹, Theo Seiler², Katharina Bause¹, Albert Albers¹

KIT SCIENTIFIC WORKING PAPERS 210



(1) Angaben zur Affiliation wie folgt:

¹ Institut für Produktentwicklung

² MoThor Batteries

(2) Angaben zu Parallelveröffentlichungen in Sammelwerken, Kongressen

(3) Angaben zu Projekten, Auftraggeber, Sponsoren, URLs, Projektnummern sowie weitere nicht titelnahen Angaben

Institut für Produktentwicklung
Kaiserstr. 10
76131 Karlsruhe
www.ipek.kit.edu

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
www.kit.edu



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

2023

ISSN: 2194-1629

Konzeptionierung einer lösbaren Zellkontaktierung für Akku-Packs zur Erhöhung der Demontage- und Recyclingfreundlichkeit

Philip Müller-Welt¹, Theo Seiler², Katharina Bause¹, Albert Albers¹

¹*IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

²*MoThor Batteries GbR*

Abstract

Die Verwendung von Batteriesystemen im Mobilitätssektor ist ein wichtiger Faktor zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und somit für den Schutz der Umwelt. Allerdings ist die Demontage, die Wiederverwendung und das Recycling der Akkus derzeit noch eine Herausforderung. Batteriezellen werden in der Regel durch Schweißverbindungen kontaktiert. Dies macht es unmöglich, einzelne Zellen aus dem Pack zerstörungsfrei zu entfernen. Bisher gibt es bereits Kenntnisse über die Eigenschaften von lösbaren elektrischen Kontakten. Es gibt jedoch noch keine Ansätze, die eine lösbare Kontaktierung ermöglichen, wobei die Herausforderungen bei Batteriepacks mit mehreren Zellen und deren Design berücksichtigt werden. Die Demontage des Packs ist das Hauptproblem im Hinblick auf ein kreislaufwirtschaftskonformes Design. Lösbare Zellkontakte sind hierfür eine mögliche Lösung. Die größte Herausforderung bei der Umsetzung lösbarer Zellkontakte besteht darin, einen möglichst geringen und gleichmäßigen Kontaktwiderstand zu erreichen. Dazu ist ebenfalls ein Verständnis über die Abhängigkeiten zwischen dem Kontaktwiderstand und verschiedenen Einflussfaktoren notwendig. Daher stellen die Autoren eine Analyse relevanter Wechselwirkungen in der lösbaren Kontaktierung von Batteriezellen im Format 18650 vor. Diese umfasst unter anderem eine Untersuchung der Kontaktflächen verschiedener Zellen und die Ermittlung deren Kontaktwiderstände unter Verwendung verschiedener Kontaktpaarungen. Abschließend werden, basierend auf Anforderungen an die Kontaktierung der Zellen, verschiedene Lösungsprinzipien für eine lösbare Kontaktierung definiert und ein initiales Konzept daraus abgeleitet.

1 Motivation und Zielsetzung

Die Reduktion von Treibhausgasemissionen stellt einen zentralen Baustein für den Umweltschutz dar. Vor allem der Verkehrssektor trägt in Deutschland mit 19 % am drittmeisten zu den Treibhausgasemissionen bei [1]. Ein großer Trend im Verkehrssektor ist die Hinwendung zur Elektromobilität, der sich nicht nur auf den individuellen Personenverkehr in Form privat genutzter PKW beschränkt, sondern auch im Bereich der Mikromobilität in urbanen Regionen angekommen ist [2]. In Städten ist ein zunehmendes Angebot von E-Scootern und die Nutzung von E-Bikes zu sehen, die sich als komfortable Alternative zum öffentlichen Personenverkehr und der Nutzung privater PKW anbieten.

Wichtiger Bestandteil der elektrisch betriebenen Kleinfahrzeuge ist die Batterie, die sich aus mehreren parallel und seriell verschalteten Einzelzellen zusammensetzt. Die Einzelzellen weisen aufgrund von Produktionsungenauigkeiten und individueller Alterung unterschiedliche Eigenschaften auf, die sich negativ auf dessen Performance auswirken können [3]. Aufgrund dessen zeigt sich der Austausch einzelner Zellen als Möglichkeit zur Erhöhung der Lebenszyklenzahl einer Lithium-Ionen Batterie [4, 5].

Die Herstellung von Lithium-Ionen Zellen gestaltet sich aufgrund der Verwendung seltener Erden wie Lithium, Nickel oder Cobalt als sozio-ökologische Belastung für die Umwelt [6]. Zusätzlich sind die Vorkommen der Materialien, welche für die Herstellung von Lithium-Ionen Batterien verwendet werden, begrenzt, weswegen dem Recycling gebrauchter Batteriezellen immer mehr Bedeutung zukommt [7]. Erste Lebenszyklusbetrachtungen von Lithium-Ionen Batterien bestätigen hierbei die Notwendigkeit zum Recycling von Einzelzellen zur Reduktion negativer sozio-ökologischer Umwelteinflüsse und als Antwort auf die Ressourcenknappheit [8].

Der Austausch und das Recycling einzelner Zellen hängen somit von der Demontagefähigkeit der Zelle innerhalb des Zellpacks ab, welche maßgeblich durch die Kontaktierung festgelegt wird. Derzeit häufig eingesetzte Verfahren sind Schweißen, Löten oder seltener mechanische Verbindungen. Über die Betriebsdauer wird ein möglichst gleichbleibender, verlustarmer Stromfluss angestrebt, sodass das Ultraschallschweißverfahren aufgrund geringer Kontaktierungswiderstände und stabilen Verbindungen am verbreitetsten ist [9, 10]. Für den flexiblen Austausch einzelner Zellen stellt das Ultraschallschweißen aufgrund der stoffschlüssigen Verbindung eine ungeeignete Kontaktierungsmöglichkeit dar. Daraus resultiert das Bedürfnis nach einer einfach lösbaren Kontaktierung der Zellen, welche den Austausch und das Recycling von Einzelzellen ermöglicht.

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Konzeptionierung einer lösbaren Zellkontaktierung für zylindrische Zellen in einem E-Bike Batteriepack. Im ersten Schritt werden die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Kontaktkraft und Kontaktwiderstand analysiert. Aus der Analyse ergeben sich, neben dem Verständnis der Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Kontaktkraft und -widerstand, Anforderungen an die Kontaktierung. Anschließend werden im zweiten Schritt Ansätze zur lösbaren Kontaktierung von zylindrischen Zellen in einem Batteriepack mit dessen zugehöriger Aktorik konzeptioniert.

2 Stand der Forschung

Elektrische Kontakte finden in einer Vielzahl an Anwendungsfällen Verwendung. Den häufigsten Anwendungsfall stellen dabei Steckverbindungen dar. Wichtige Eigenschaft ist neben der Lösbarkeit des Kontakts, hauptsächlich der Kontaktwiderstand der maßgeblich für elektrische Verluste verantwortlich ist. Für eine Bestimmung der Eigenschaften von elektrischen Kontaktierungen ist eine genaue Untersuchung der Kontaktflächen erforderlich. Dabei ist nicht die augenscheinliche Kontaktfläche relevant, sondern die auf Basis der Oberflächentopographie entstehende Kontaktfläche, welche dann als elektrischer Leiter dient. Prinzipiell besteht dabei der Zusammenhang, dass eine steigende Leitfähigkeit mit steigendem Anteil der tatsächlich im Kontakt stehenden Fläche gegeben ist [11]. Abbildung 1 zeigt eine repräsentative Darstellung zweier im Kontakt stehenden Oberflächen sowie deren jeweiligen Anteile, die bei der Kraftübertragung und elektrischen Leitung beteiligt sind. Diese Anteile können beispielsweise auch durch Fremdschichten durch Alterung oder elastische und plastische Verformung der Oberflächenstruktur durch Aufbringung von Normalkräften beeinflusst werden.

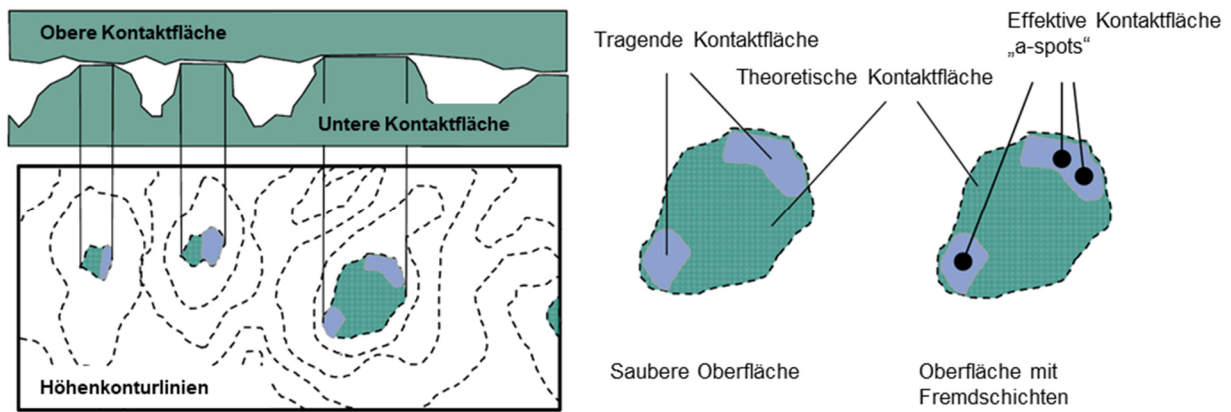


Abbildung 1: Unterschied zwischen theoretischer Kontaktfläche, tragender Kontaktfläche und leitender Kontaktfläche, übersetzt nach [11]

Für die elektrische Kontaktierung von Batteriezellen sind Schweißverfahren die gängigste Methode. Dabei werden die beiden Zellterminals mit Leiterblechen verschweißt, um somit eine elektrische Kontaktierung und Verbindung von mehreren Zellen zu einem gesamten Batteriepack zu erreichen. Typische Verfahren sind dafür z. B. das Punktschweißen, Ultraschallschweißen oder Laserschweißen. Die sich durch das jeweilige Verbindungsverfahren ergebenden Kontaktwiderstände können variieren. Abbildung 2 zeigt typische Widerstandswerte für gängige Kontaktierungsverfahren.

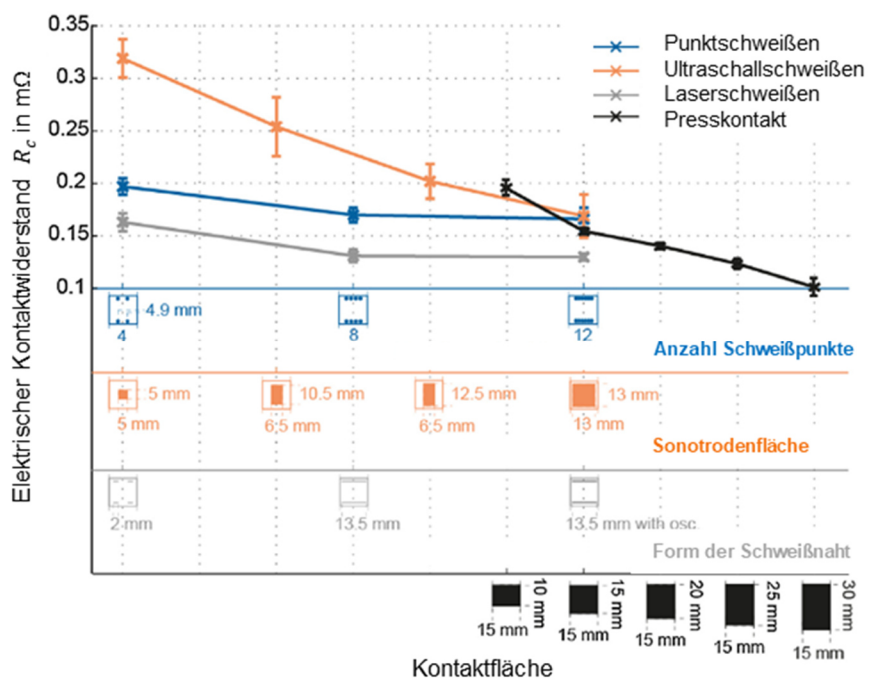


Abbildung 2: Kontaktwiderstände verschiedener Zellkontaktierungsarten, übersetzt nach [12]

Kontaktwiderstände die sich durch Punktschweißen und Laserschweißen ergeben, liegen dabei in einem Wertebereich von 130 bis 200 $\mu\Omega$. Die durch das Ultraschallschweißen erreichbaren Widerstandswerte liegen bei kleinen Kontaktflächen in einem deutlich höheren Bereich. Eine elektrische Kontaktierung durch reine Verpressung, die in Abbildung 2 durch die schwarze Kennlinie dargestellt ist, erreicht dabei vergleichbare Widerstandswerte.

Untersuchungen zur lösbaren Kontaktierung von Batteriezellen im Format 18650 wurden u. a. durch Bolsinger et al. [13] durchgeführt. Im Fokus standen dabei Einflüsse wie Kontaktkraft, Material und Alterung der Kontaktflächen auf den Kontaktwiderstand. Abbildung 3 zeigt Ergebnisse einer Kontaktwiderstandsmessung für diese verschiedenen Einflussfaktoren.

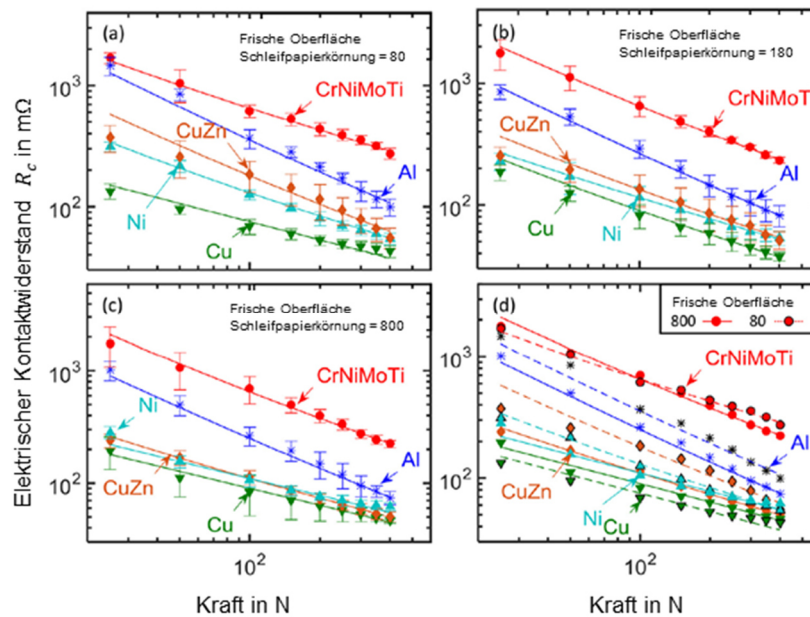


Abbildung 3: Kontaktwiderstand verschiedener Materialien, Oberflächenbeschaffenheiten und Kontaktkräfte, übersetzt nach [13]

Gut zu erkennen, ist der Haupteinfluss der aufgebracht Kontaktkraft über alle Kontaktpaarungen hinweg. Mit steigender Kontaktkraft sinkt der Kontaktwiderstand. Ebenso gut erkennbar ist der Einfluss des gewählten Kontaktmaterials, wobei Kupfer durchgängig die niedrigsten Kontaktwiderstände liefert. Weniger deutlich ist der Effekt der Alterung der Kontaktflächen und ebenso der Oberflächenrauheit zu erkennen.

Im Stand der Forschung bisher kaum betrachtet ist die Umsetzung einer lösbaren Zellkontaktierung für ein gesamtes Akkupack, sondern lediglich die Betrachtung einzelner Zellkontakte. Neben dem Verständnis des Zellkontakts ist allerdings ebenso die Untersuchung von Herausforderungen und Wechselwirkungen bei der Kontaktierung mehrerer Zellen wichtig. Unter anderem können dabei Fertigungstoleranzen oder Unterschiede zwischen Zellherstellern eine Rolle spielen. In diesem Bereich wird daher eine Lücke im aktuellen Stand der Forschung gesehen, deren Schließung einen wichtigen Beitrag zur kreislaufgerechten Gestaltung, in der das zuvor adressierte Recycling ein Baustein darstellt, von Batteriesystemen liefern kann.

3 Analyse von Wechselwirkungen im Zellkontakt und Definition von Anforderungen

Zur Umsetzung einer lösbaren Zellkontaktierung sind zunächst wichtige Zusammenhänge innerhalb des elektrischen Kontaktes zu identifizieren und analysieren, um daraus Anforderungen an das zu entwickelnde Kontaktierungskonzept ableiten zu können. Basierend auf dem aktuellen Stand der Forschung wurden dafür unter anderem das Kontaktmaterial, die Kontaktkraft sowie die Oberflächenstruktur als besonders relevante Einflussgrößen auf den Kontaktwiderstand identifiziert.

Zur Ableitung von Anforderungen an eine lösbare Kontaktierung wurden daher zunächst auf Ebene eines einzelnen Zellkontakts Einflüsse auf den Kontaktwiderstand untersucht. Bestandteil der Untersuchungen waren dabei eine Analyse der Oberflächenstruktur der Zellkontaktflächen verschiedener Zellhersteller, sowie experimentell bestimmte Kontaktwiderstände bei Kombinationen aus Kontaktpaarungen verschiedener Zellhersteller, Kontaktmaterialien, Kontaktkräften und Oberflächenbeschaffenheiten. Letztlich wurden die dadurch gewonnen Informationen genutzt, um Anforderungen an die zu konzipierende Kontaktierung der Zellen zu quantifizieren.

3.1 Zellanalyse

Das umzusetzende Konzept der Zellkontaktierung soll für zylindrische 18650 Lithium-Ionen-Zellen erfolgen, von denen 40 Stück für das Anwendungsbeispiels eines E-Bike Akku-Packs verbaut werden. Dies entspricht einem typischen Aufbau eines Akkus für beispielsweise E-Bikes. Prinzipiell soll dabei die Auswahl der Zelle nicht durch das zu entwickelnde Kontaktierungskonzept beeinflusst werden. Daher wurden zunächst Zellen verschiedener Zellhersteller untersucht, um deren potentiellen Unterschiede zu identifizieren und deren Einflüsse im Kontaktierungskonzept berücksichtigen zu können.

Maßgeblicher Faktor für den Kontaktwiderstand ist die Oberflächentopographie der Kontaktflächen. Dabei spielen sowohl Rauheiten der Kontaktflächen als auch deren grundsätzliche Form eine Rolle. Zunächst wurden die Polflächen der Zellen mittels eines Weißlichtinterferometers vermessen. Messungen der Oberfläche des positiven Zellterminals sind in Abbildung 4 dargestellt. Betrachtet wurde dabei eine Fläche von 1 mm auf 1 mm mit einer Auflösung von 2 μm . Verglichen wurde dabei Zellen von drei verschiedenen Zellherstellern. Es wurden die Zellen LG INR18650, MJ1Samsung INR18650-35E sowie Panasonic NCR18650 PF untersucht.

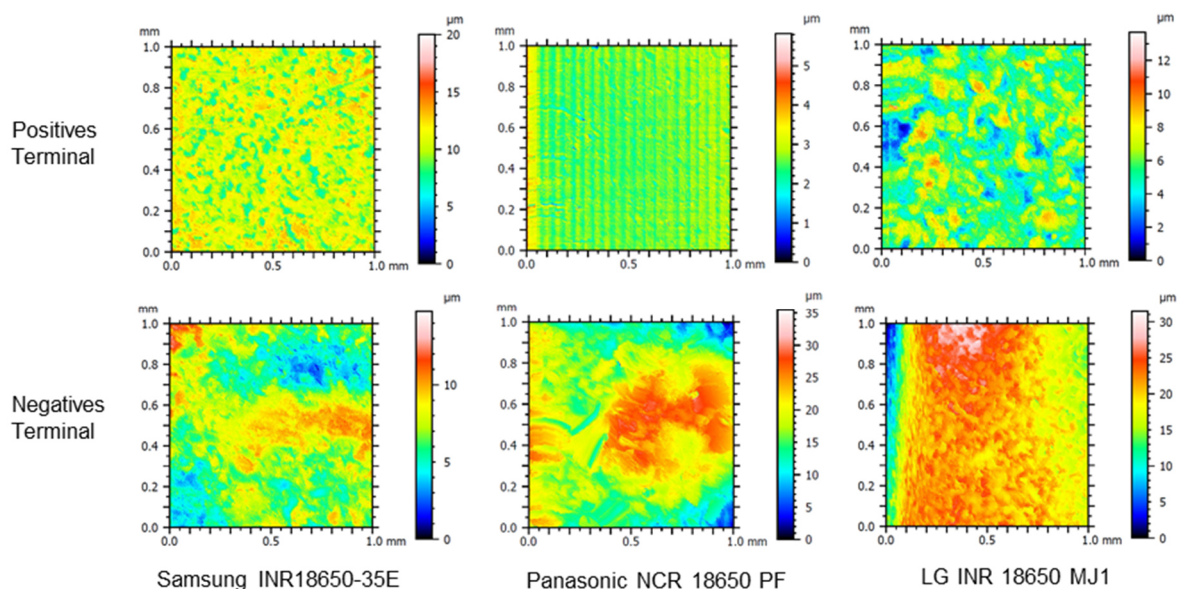


Abbildung 4: Oberflächentopographie der Kontaktflächen verschiedener Zellhersteller

Erkennlich sind bei Betrachtung der Oberflächenrauheiten gewisse Unterschiede. Die Samsung und LG Zellen weisen eine Rautiefe von ca. 15 - 20 μm auf wobei diese bei den Panasonic Zellen bei 10 – 15 μm liegt. Ebenfalls gut sichtbar ist eine gerichtete Strukturierung der Oberfläche im Falle der Panasonic Zelle, wobei die beiden anderen Zelltypen eine willkürliche Oberflächenstruktur aufweisen.

Zusätzlich zur Betrachtung der Rauheiten wurden ebenfalls die gesamten Flächen der Zellterminals vermessen, um in deren Formgebung Unterschiede erkennen zu können. Messungen der positiven und negativen Zellterminals sind beispielhaft in Abbildung 5 zu sehen.

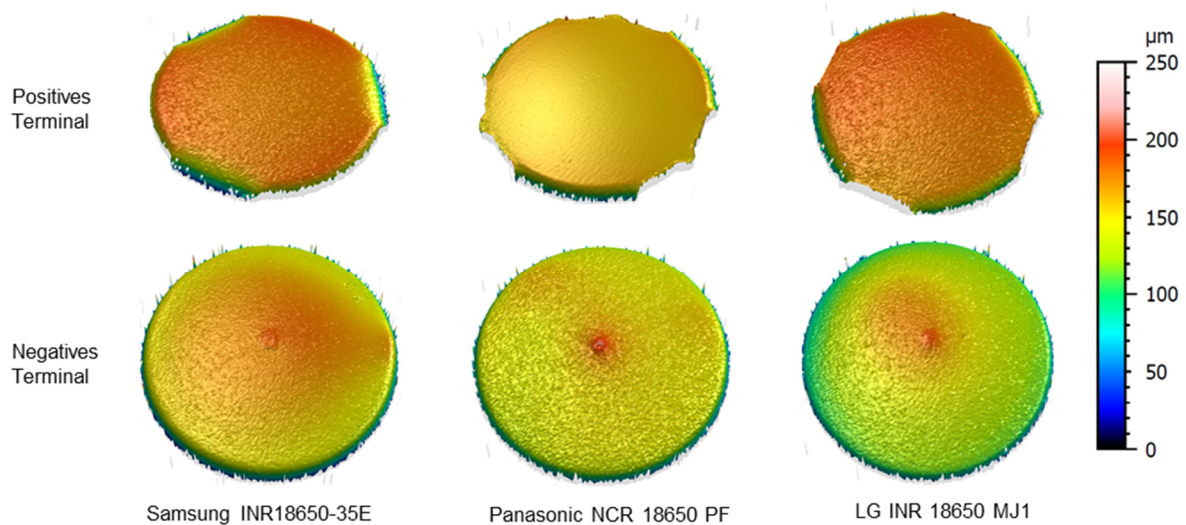


Abbildung 5: Oberflächenmessung des positiven und negativen Zellterminals verschiedener Zellhersteller

Zu erkennen sind auch hier wieder Unterschiede in der Ausprägung der Gestalt der Zellterminals. Neben der Anzahl an Stegen zur Anbindung der Kontaktfläche an die Zelle bestehen auch unterschiedliche Randerhöhungen der Kontaktfläche im Bereich der Stege. Besonders deutlich sind diese im Falle der Samsung Zellen zu erkennen. Auf negativer Zellseite weisen alle Zellen eine Erhöhung im mittleren Bereich der Kontaktfläche auf, welche potentiell eine ausreichend große Kontaktfläche verhindern können.

Weitere auffällige Unterschiede zwischen den drei betrachteten Zelltypen sind die Längen- und Durchmesser-toleranzen der Zellen, welche in der Konzeptdefinition mitberücksichtigt werden müssen. Insbesondere die Längentoleranzen können eine gleichmäßige Verpressung aller Zellen und somit eine gleichmäßige Kontaktierung deutlich erschweren. Die Längentoleranzen werden dabei herstellerseitig für die LG INR18650 MJ1 Zelle mit $\pm 0,05$ mm, für die Samsung INR18650-35E Zelle mit $\pm 0,15$ mm und für die Panasonic NCR18650 PF Zelle mit $\pm 0,1$ mm angegeben.

3.2 Bestimmung von Kontaktwiderständen

Zur Untersuchung der Einflüsse verschiedener Faktoren auf den Kontaktwiderstand wurde ein Versuchsaufbau genutzt der eine Messung von Spannungen die im Kontakt abfallen bei verschiedenen Kontaktkräften ermöglicht. Dieser ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

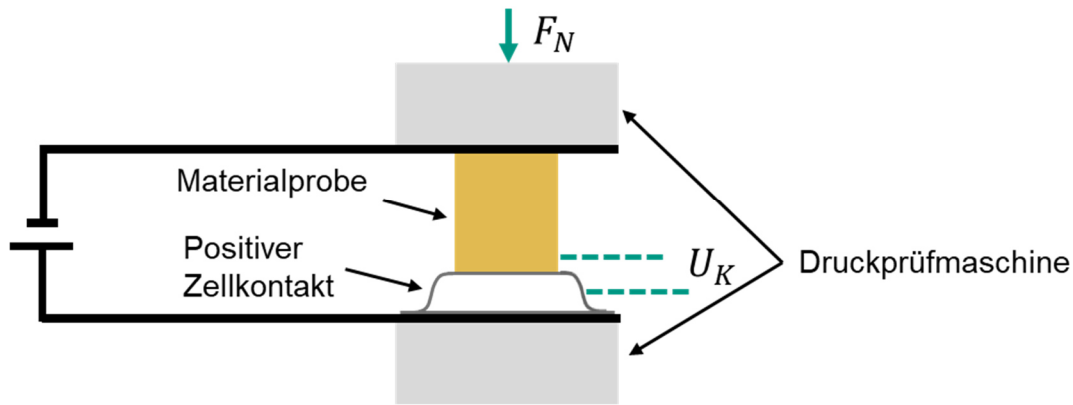


Abbildung 6: Schematischer Versuchsaufbau zur Ermittlung von Kontaktwiderständen

Zur Bestimmung der Kontaktwiderstände wurden jeweils ein positiver Zellkontakt mit einer Materialprobe mithilfe einer Druckprüfmaschine mit definierten Normalkräften F_N verpresst. Ebenso wurde ein Stromkreislauf aufgebaut der den Zellkontakt und die Materialprobe mit einem Konstantstrom von 5 A beaufschlagt. Zur Ermittlung des sich dabei ergebenden Kontaktwiderstands wurde der Spannungsabfall in der Nähe der Kontaktfläche von Zellkontakt zu Materialprobe U_K mittels eines Multimeters gemessen. Nach dem Ohmschen Gesetz kann somit der Kontaktwiderstand anhand des Spannungsabfalls im Kontakt und des angelegten Stroms ermittelt werden.

Bestandteil der Versuchsreihe waren die bereits genannten drei verschiedenen Zelltypen und Kontaktmaterialproben aus Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel und Messing die mit Schleifpapierkörnungen 80, 320 und 800 präpariert wurden. Kombinationen aus diesen Varianten wurden jeweils mit Normalkräften von 20, 40, 60, 80, 100, 150 und 200 N belastet und deren Kontaktwiderstand bestimmt. Abbildung 7 zeigt beispielhaft Ergebnisse der Kontaktwiderstandsmessung für eine Samsung Zelle mit einer Nickelprobe als Kontaktmaterial.

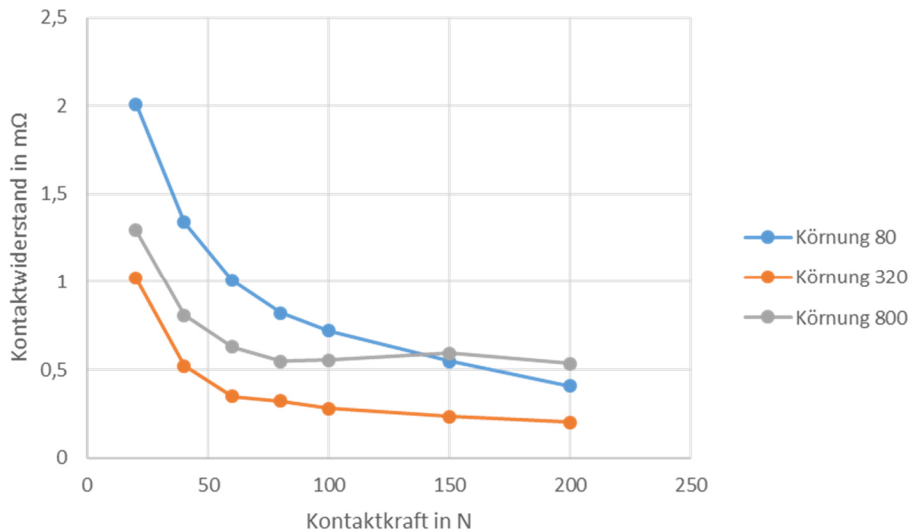


Abbildung 7: Kontaktwiderstand einer Samsung Zelle und Nickelprobe mit verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten und Kontaktkräften

Über die gesamte Versuchsreihe hinweg konnte wie bereits aus dem Stand der Forschung bekannt, aufgrund des steigenden Anteils an in Kontakt stehender Fläche, ein sinkender Kontaktwiderstand bei steigenden Kontaktkräften erkannt werden. Die Stärke des Einflusses der Kontaktkraft war dabei

jedoch von weiteren Einflussfaktoren, wie dem verwendeten Kontaktmaterial oder des betrachteten Zelltyps abhängig. Ebenfalls erkennbar sind deutliche Unterschiede zwischen den betrachteten Zellherstellern, wobei die Panasonic Zellen durchgehend die geringsten Kontaktwiderstände aufweisen. Ebenso ergaben sich bei diesen bereits bei geringen Kontaktkräften tiefe Kontaktwiderstände, welche dann bei steigenden Kontaktkräften nur eine geringe Änderung zeigten. Potentiell ist dies auf die geringere Rautiefe sowie die nicht so stark ausgeprägte Randerhöhung des Zellterminals zurückzuführen. Der Einfluss des Kontaktmaterials entspricht dem bereits aus dem Stand der Forschung bekannten Verhältnissen, nach denen Kupfer- und Nickelproben die geringsten Kontaktwiderstände aufweisen.

3.3 Ableitung von Anforderungen für Konzeptdefinition

Basierend auf den vorherigen Untersuchungen wurden prinzipielle Anforderungen an die Kontaktierung der Zellen und die zugehörige Aktorik aufgestellt. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist in Abhängigkeit des verwendeten Zelltyps eine unterschiedliche Kontaktkraft zu Erreichung eines Kontaktwiderstands von $250 \mu\Omega$ oder niedriger erforderlich. Dieser Wert wurde für die Kontaktierung als zu den herkömmlichen Schweißverfahren vergleichbar definiert.

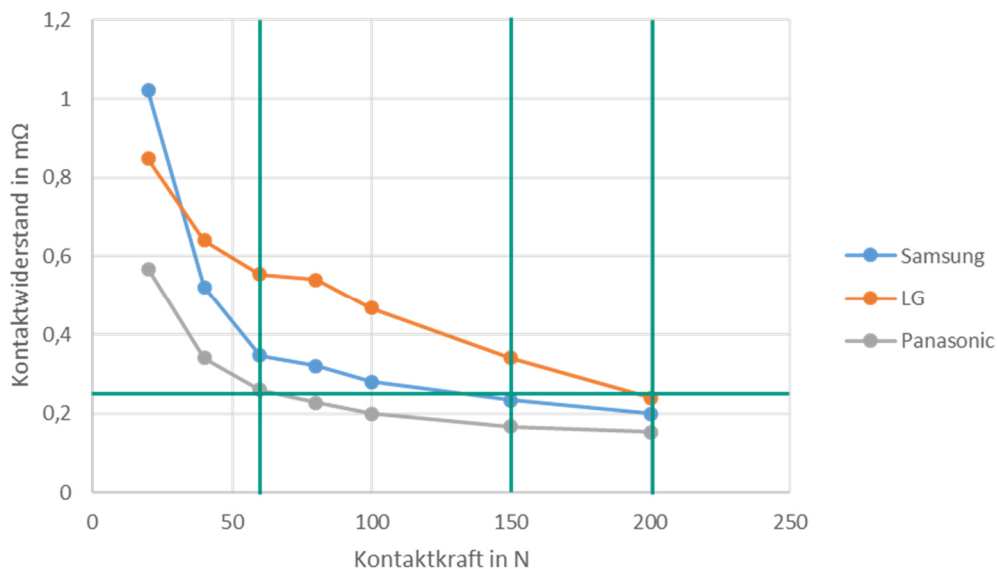


Abbildung 8: Erforderliche Kontaktkraft für verschiedene Zelltypen und Nickelprobe mit Körnung 320

Für eine Panasonic NCR 18650 PF Zelle ist eine Kraft von 60 N ausreichend wohingegen für die beiden anderen Zelltypen 150 N bzw. 200 N notwendig sind. Daher wurde als erste Anforderung eine Einstellbarkeit der Kontaktkraft zwischen 100 und 200 N definiert. Zusätzlich soll zum Ausgleich der Erhöhung in der Mitte des negativen Terminals eine Aussparung in den Kraftaufbringenden Elementen vorgesehen werden. Ebenso wichtig ist ein Längenausgleich der Zellen von 0,3 mm bei geringen Kraftunterschieden zwischen den Zellen. Zusätzlich sollen eine einfache Montage und Demontage mithilfe von üblichen Anwenderkräften und typischem Werkzeug, wie Drehmomentschlüsseln oder Luftpumpen möglich sein.

4 Konzeptfestlegung der lösbaren Kontaktierung

Als Grundlage für den Entwicklungsprozess des zu entwickelnden Batteriepacks dient das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) [14]. Aktivitäten sind dabei unter anderem die Ideenfindung, die Modellierung des Prinzips und der Gestalt sowie der Aufbau eines Prototyps. Diese Aktivitäten können wiederum mittels des SPALTEN Problemlösungsprozesses unterteilt werden. Somit werden aufbauend auf der Situationsanalyse und Problemeingrenzung in Kapitel 3 im Folgenden verschiedene Lösungsalternativen für das grundsätzliche Prinzip der Kontaktierung und dessen Gestaltung erarbeitet und ausgewählt sowie initial umgesetzt.

4.1 Erarbeitung alternativer Lösungsprinzipien

Basierend auf den initialen Anforderungen sollen Konzepte für die Kontaktierung der Zellen definiert werden. Dazu wurden zunächst für die innerhalb des Batteriepacks zu erfüllenden Hauptfunktionen verschiedene Lösungsprinzipien erarbeitet. Abbildung 9 zeigt den so entstandenen Morphologischen Kasten.

| | | | | | |
|--|---|---|---|---|---------|
| Aufbringung Verspannkraft an das Pack | Verschraubung  | Spannbänder  | Schnappverbindung  | Hydraulik  | |
| Kraftverteilung | Materialsteifigkeit  | Gehäuseversteifungen  | Flächige Verschraubung/Klemmung  | | |
| Aufbringung Kraft auf Zelle | Druckplatten  | Individuell pro Zelle  | | | |
| Kontaktmaterial | Stahl | Alu | Nickel | Kupfer | Messing |
| Ausgleich der Längentoleranz | Materialsteifigkeit  | Federn  | Biegebalken  | Hydraulik  | |
| Elektrische Sicherung | Schmelzsicherung  | Keine Sicherung  | | | |

Abbildung 9: Morphologischer Kasten verschiedener Lösungsprinzipien

Eine der zu erfüllenden Funktionen ist die Einbringung der Kontaktkraft in das Batteriepack und deren Einstellbarkeit. Grundsätzlich kann dies über eine Verschraubung, Spannbänder, eine Schnappverbindung oder Hydraulik gelöst werden. Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Kraftverteilung ist eine ausreichend große Steifigkeit der Packstruktur erforderlich. Diese kann durch sinnvolle Materialauswahl und Dimensionierung, geometrische Versteifungen oder gleichmäßige Krafteinleitung erreicht werden. Eine weitere wichtige Funktion stellt die Einleitung der Kraft in die Zelle dar. Diese kann entweder individuell in jede Zelle erfolgen und einstellbar sein oder über ein einzelnes Element in alle Zellen gleichzeitig erfolgen. In Abhängigkeit zur aufzubringenden Kraft steht weiterhin das ausgewählte Kontaktmaterial, welches somit auch in der Konzeptfindung berücksichtigt werden muss. Zur gleichmäßigen Kontaktkraftverteilung ist es ebenso wichtig, die vorhandene Längstreuung der Zellen ausgleichen zu können. Dies kann entweder durch geeignete Wahl des Materials in der Krafteinleitung, über Federelemente, gezielte Einstellung der geometrischen Steifigkeit oder einen hydraulischen Längenausgleich erfolgen. Letztlich spielt in der Gestaltung der Kontaktierung auch noch eine Rolle, ob eine integrierte Schmelzsicherung vorgesehen werden soll.

4.2 Ableitung eines Kontaktierungskonzepts

Mithilfe der zuvor dargestellten alternativen Lösungen erfolgte anschließend eine erste Modellierung verschiedener Konzepte, die auf jeweils unterschiedlichen Kombinationen der Lösungsprinzipien basieren. Diese sind schematisch in Abbildung 10 dargestellt. Auf die Integration einer Schmelzsicherung wird verzichtet, da diese aktuell in E-Bike-Akkus nicht gängig ist. Die Überlastabsicherung erfolgt hier durch das Battery Management System.

| Funktions- erfüllung | Konzept 1 | Konzept 2 | Konzept 3 | Konzept 4 |
|---------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| Kraftaufbringung | Verschraubung | Pneumatik Druckplatte | Pneumatik Druckplatte | Verschraubung |
| Kraftverteilung | Materialsteifigkeit / Schraubposition | Nicht erforderlich | Nicht erforderlich | Materialsteifigkeit |
| Aufbringung Kraft auf Zelle | Kombiniert | Kombiniert | Einzel | Kombiniert |
| Ausgleich der Längentoleranz | Federn | Federn | Pneumatik | Biegebalken |

Abbildung 10: Modellierung von Konzepten für die lösbare Kontaktierung

Konzept 1 besteht aus Spannelementen, welche mittels einer Verschraubung einstellbar verspannt werden und somit eine Kraft auf die Zellen ausüben. Die gleichmäßige Kraftverteilung wird dabei durch den Einsatz von Federelementen sowie die kraftflussgerechte Gestaltung der Verspannung gewährleistet. Konzept 2 und 3 verwenden eine Kraftaufbringung durch Pneumatik, wobei die Kraftverteilung entweder durch Federelemente oder individuelle Zylinder pro Zelle erfolgen sollen. Konzept 4 ähnelt Konzept 1, wobei in diesem Fall der Längenausgleich nicht durch separate Federelemente, sondern gezielte Gestaltung der Steifigkeit der Spannelemente im Bereich der Zellen erfolgen soll.

Ein Vergleich der Konzepte erfolgte mittels einer Nutzwertanalyse anhand von Kriterien wie Komplexität in der Gestaltung, Aufwand in Montage und Demontage, Kosten, Volumen und Gewicht. Letztlich wurde sich dadurch für Konzept 1 entschieden und dieses weiter ausgearbeitet. Das weiter ausdetaillierte Konzept ist in Abbildung 11 zu sehen.

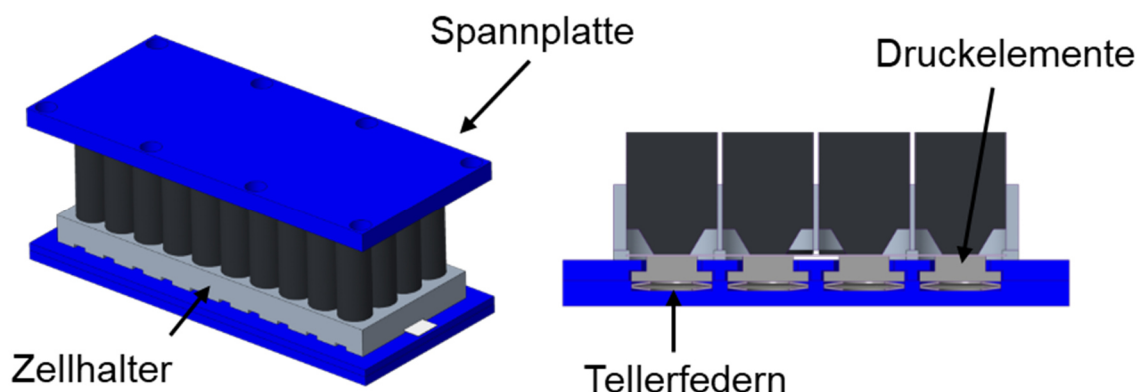


Abbildung 11: Initiales Konzept der Zellkontaktierung

Dieses besteht letztlich aus zwei Spannplatten die über eine bestimmte Anzahl an Schrauben verspannt werden können. Die aufgebrachte Spannkraft kann dabei mithilfe eines Drehmomentschlüssels gezielt eingestellt werden. Dabei ist lediglich ein für den jeweiligen Zelltyp erforderliches Montagemoment anzugeben, welches dem Monteur bereitgestellt werden kann. Zum Längenausgleich sind pro Zelle Tellerfedern vorgesehen, welche einen geringen Bauraumbedarf mit gut einstellbarer Steifigkeit kombinieren. Für eine direkte Krafteinleitung in die Zelle sind zusätzliche Druckelemente vorgesehen. Für eine weitere Finalisierung des Konzeptes sind Aspekte wie die konkrete Auswahl einer Federsteifigkeit und Dimensionierung der Spannplatten inklusive deren Materialauswahl unter Berücksichtigung der Schraubpositionierung erforderlich. Zur initialen Abschätzung der Umsetzbarkeit des Konzeptes wurde dazu ein FE-Modell aufgebaut, welches eine Auswertung der Plattendurchbiegung und des Kontaktdrucks auf den Zellen ermöglicht. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse für eine Betrachtung von 5 mm dicken Spannplatten aus Aluminium und einer insgesamt über 8 Schrauben aufgebrachten Spannkraft von 4000 N.

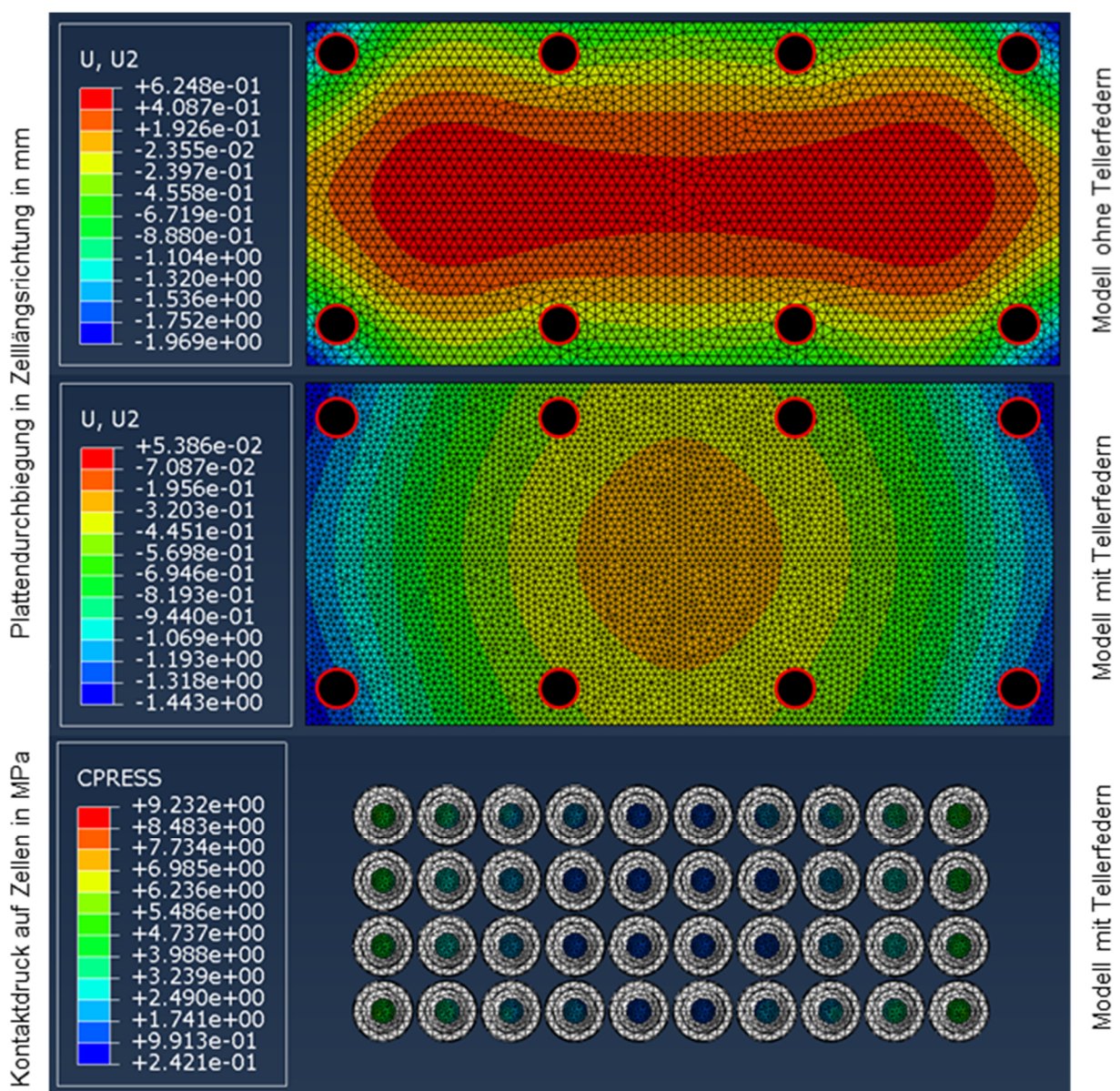


Abbildung 12: Simulation des Verschraubungskonzeptes mit 8 Schrauben

Deutlich erkennbar ist eine Durchbiegung der Spannplatte bei Verschraubung des Akkupacks. Bei Positionierung der Schrauben am äußeren Rand der Spannplatten ist eine Wölbung der Platten in Abbildung 12 oben erkennbar, die eine Abhebung der Platte von den Zellen im mittleren Bereich des Packs verursacht. In diesem Bereich ist somit keine Kontaktierung der Zellen mehr gewährleistet. In der mittleren Darstellung sind zusätzlich Tellerfedern modelliert die einen Wegausgleich ermöglichen können. Gut erkennbar ist dabei, dass die Plattendurchbiegung deutliche homogener ist und alle Bereiche einen negativen Wert aufweisen, was bedeutet, dass keine Anhebung der Platten von den Zellen erfolgt. Dies ist auch in der Darstellung des Kontaktdrucks auf den Zellen erkennbar, in der alle Zellen einen Kontakt zur Spannplatte aufweisen. Eine prinzipielle Umsetzbarkeit des Konzepts ist somit gegeben. Für eine weitere Verbesserung der Druckverteilung ist eine Anpassung der Schraubpositionen und Anzahl sowie weitere Versteifung der Spannplatten denkbar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die grundsätzliche Umsetzbarkeit einer löslichen Kontaktierung von zylindrischen Batteriezellen für den Anwendungsfall eines E-Bike-Akkus untersucht. Dazu wurden zunächst relevante Abhängigkeiten des Kontaktwiderstands der lösbaren Zellkontaktierung identifiziert. Darunter fallen zum Beispiel die Kontaktkraft, das Kontaktmaterial oder die Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen. Zur Schaffung eines tieferen Verständnisses der Wechselwirkungen wurden zunächst relevante Wertebereiche der verschiedenen Einflussfaktoren definiert, die für weitere Untersuchungen genutzt werden sollen. Messungen der Oberflächen der Kontaktflächen verschiedener Zelltypen haben dabei deutliche Unterschiede in der Oberflächenstruktur zwischen verschiedenen Zellherstellern gezeigt. Ebenso waren Unterschiede in der Formgebung der Kontaktfläche der Zellen zu erkennen. Zur Untersuchung des Einflusses dieser Unterschiede wurden anschließend Versuche zur Messung der Kontaktwiderstände der 3 Zelltypen mit verschiedenen Kontaktmaterialien und Oberflächenrauheiten bei unterschiedlichen Kontaktkräften durchgeführt. Diese zeigten einen deutlichen Trend eines abfallenden Kontaktwiderstands bei steigenden Kontaktkräften über alle Versuche hinweg. Ebenso war ab einer Kontaktkraft von 100 – 150 N eine verringerte Änderung des Kontaktwiderstandes zu erkennen. Im Vergleich verschiedener Kontaktmaterialien ergaben Proben aus Kupfer und Nickel die deutlich geringsten Kontaktwiderstände. Die in der Analyse der Oberflächenrauheiten erkennbaren Unterschiede zwischen den Zellherstellern konnten ebenfalls in den Messungen des Kontaktwiderstands erkannt werden, wobei Panasonic NCR 18650 PF Zellen durchgehend die geringsten Widerstandswerte aufzeigten.

Neben den untersuchten Einflüssen auf den Kontaktwiderstand spielen für die Umsetzung eines gesamten Packs mit lösbarer Kontaktierung weitere Faktoren eine Rolle. Mitunter stellt die Längsstreuung der Zellen einen wichtigen Faktor dar, der bei der Konzeptfindung berücksichtigt werden muss. Zusätzlich sind Punkte wie einfache Montage und Demontage, Material- und Kosteneinsparung und eine gleichmäßige Verpressung aller Zellen zu berücksichtigen.

Zur Umsetzung der lösbaren Kontaktierung in einem gesamten Batteriepack wurden anschließend zunächst für die zu erfüllenden Hauptfunktionen verschiedene Lösungsprinzipien identifiziert und daraus verschiedene potentielle Konzepte abgeleitet. Diese wurden anhand bestimmter Kriterien miteinander verglichen. Abschließend wurde eines der Konzepte, welches eine Verschraubung zweier Spannplatten und den Einsatz von Tellerfedern zum Toleranzausgleich vorsieht, weiter ausdetailliert und auf initiale Umsetzbarkeit geprüft. Unter anderem wurden dabei die sich ergebenden Kraftunterschiede zwischen den Zellen und erforderlichen Montagekräfte analysiert.

In weiteren Schritten sollen die definierten Konzepte hinsichtlich der Kraftverteilung auf die einzelnen Zellen sowie deren Gewicht und Volumen weiter optimiert werden. Dazu werden unter Berücksichtigung der hier definierten Randbedingungen Gestaltparameter der Konzepte wie beispielsweise die Anzahl und Positionierung der Schrauben oder Spannplattendicke variiert und optimiert werden. Dazu werden FE-basierte Simulationsmodelle aufgebaut, die das Verformungsverhalten und die Druckverteilung auf die Zellen über das gesamte Akku-Pack ermöglichen und vergleichbar machen. Nach anschließender finaler Gestaltung der lösbaren Zellkontaktierung soll zudem ein Demonstrator des Akku-Packs aufgebaut werden an dem die grundsätzliche Funktionserfüllung gezeigt werden kann. Dabei werden Untersuchungen zur erforderlichen Montagekraft und sich ergebenden Druckverteilung auf die Zellen unter verschiedenen Randbedingungen untersucht.

6 Danksagungen

Dieses Paper zeigt Teile der Ergebnisse des Projekts „IC2 – Lösbare Zellkontaktierung zur Erhöhung der Demontage- und Recyclingfreundlichkeit von Batteriepacks“ als Teil des Innovationscampus Mobilität der Zukunft. Die Autoren danken dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg für die Förderung des Projekts.

7 References

- [1] Umweltbundesamt, *Klimaschutz im Verkehr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr#rolle> (Zugriff am: 6. Februar 2023).
- [2] M. Pathak, R. Slade, P. R. Shukla, J. Skea, R. Pichs-Madruga und D. Ürge-Vorsatz, „Technical Summary“ in *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, Cambridge, 2022.
- [3] D. Oeser, A. Ziegler und A. Ackva, „Single cell analysis of lithium-ion e-bike batteries aged under various conditions“, S. 25–31, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.06.101.
- [4] M.-K. Tran, C. Cunanan, S. Panchal, R. Fraser und M. Fowler, „Investigation of Individual Cells Replacement Concept in Lithium-Ion Battery Packs with Analysis on Economic Feasibility and Pack Design Requirements“, S. 2263, doi: 10.3390/pr9122263.
- [5] M. Mathew, Q. H. Kong, J. McGrory und M. Fowler, „Simulation of lithium ion battery replacement in a battery pack for application in electric vehicles“, S. 94–104, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.010.
- [6] B. E. Murdock, K. E. Toghil und N. Tapia-Ruiz, „A Perspective on the Sustainability of Cathode Materials used in Lithium-Ion Batteries“, S. 2102028, doi: 10.1002/aenm.202102028.
- [7] M. Weil, S. Ziemann und J. Peters, „The Issue of Metal Resources in Li-Ion Batteries for Electric Vehicles“, S. 59–74, doi: 10.1007/978-3-319-69950-9_3.
- [8] M. Mohr, J. F. Peters, M. Baumann und M. Weil, „Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes“, S. 1310–1322, doi: 10.1111/jiec.13021.
- [9] S. S. Lee, T. H. Kim, S. J. Hu, W. W. Cai und J. A. Abell, „Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review“, S. 541–549, doi: 10.1115/MSEC2010-34168.
- [10] A. Das, D. Li, D. Williams und D. Greenwood, „Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing“, S. 22, doi: 10.3390/wevj9020022.

- [11] A. Albers, P. Martin und B. Lorentz, „Modeling and Design of Contacts in electrical Connectors“ in *International Conference on Engineering Design, ICED11*, Lyngby/Copenhagen, Dänemark, 2011, S. 268–277.
- [12] M. J. Brand, P. Berg, E. I. Kolp, T. Bach, P. Schmidt und A. Jossen, „Detachable electrical connection of battery cells by press contacts“, S. 69–77, doi: 10.1016/j.est.2016.09.011.
- [13] C. Bolsinger, M. Zorn und K. P. Birke, „Electrical contact resistance measurements of clamped battery cell connectors for cylindrical 18650 battery cells“, S. 29–36, doi: 10.1016/j.est.2017.04.001.
- [14] A. Albers, N. Reiß, N. Bursac und T. Richter, „iPeM - integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering“ in *26th CIRP Design Conference*, Stockholm, Schweden, 2016, 100-105.

KIT Scientific Working Papers
ISSN 2194-1629

www.kit.edu