# Produktionsverfahren von Batteriezellen und -systemen

# 15

Heiner Hans Heimes, Benjamin Dorn, Marc Locke, Sarah Wennemar, Robert Ludwigs, Lorenz Plocher und Simon Voß

Die Bereitstellung der elektrischen Antriebsenergie erfolgt in batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) derzeit überwiegend durch Lithium-Ionen-Batteriesysteme. Diese Systeme bestehen aus Batteriemodulen und Batteriezellen in unterschiedlichen Formaten. Das Batteriesystem ist dabei eine Schlüsselkomponente des Elektrofahrzeugs und beeinflusst maßgeblich die

H. H. Heimes
Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn
Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de

M. Locke
Senior Battery Expert, ACCURE Battery Intelligence, Aachen, Deutschland
E-Mail: m.locke@accure.net

S. Wennemar (✉)
Gruppenleiterin, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: s.wennemar@pem.rwth-aachen.de

R. Ludwigs · L. Plocher
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: r.ludwigs@pem.rwth-aachen.de; l.plocher@pem.rwth-aachen.de

S. Voß
Geschäftsführer eLab und Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: s.voss@pem.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_15

Reichweichte sowie die Performance. Außerdem macht das Batteriesystem einen Großteil der Kosten von heutigen Elektrofahrzeugen aus. Um im internationalen Wettbewerb langfristig erfolgreich zu sein, müssen Hersteller von Elektrofahrzeugen daher bereits in der Entwicklung und Produktion von Batteriesystemen Qualitäts- und Kostenpotenziale ausschöpfen. Darüber hinaus wird eine nachhaltige Produktion von Batteriezellen, -modulen und -systemen besonders in Europa in den kommenden Jahren immer wichtiger.

Das folgende Kapitel stellt die Herstellungsprozesse von Batteriezellen mit den Hauptproduktionsschritten „Elektrodenfertigung", „Zellassemblierung" und „Zellfinalisierung" dar. Anschließend werden die notwendigen Produktionsprozesse für die Herstellung von Batteriemodulen und Batteriesystemen erläutert. Ein abschließender Ausblick auf künftige Produktionsprozesse in der Batteriezellfertigung soll mögliche Differenzierungsmerkmale für Batterie- und Elektrofahrzeughersteller aufzeigen.

## 15.1 Herstellungsprozess einer Batteriezelle

Die Prozesskette zur Herstellung einer Batteriezelle wird in die Elektrodenfertigung, die Zellassemblierung und die Zellfinalisierung unterteilt.[1]

### 15.1.1 Elektrodenfertigung

Die Elektrodenfertigung umfasst sämtliche Prozessschritte zur Herstellung der Batterieelektroden. Dabei wird zwischen Anoden und Kathoden differenziert. Für die Anoden- und Kathodenherstellung kommen die gleichen Prozesse zum Einsatz, die verwendeten Materialien unterscheiden sich jedoch. Das Aktivmaterial auf Anodenseite ist in aktuellen Lithium-Ionen-Batterien graphitbasiert. Auf der Kathodenseite kommt meist NMC ($LiNi_xMn_yCo_zO_2$), NCA ($LiNi_xCo_yAl_zO_2$) oder LFP ($LiFePO_4$) als Aktivmaterial zum Einsatz. Die Herstellung von Anoden und Kathoden erfolgt auf separaten Produktionslinien, die üblicherweise räumlich voneinander getrennt sind, um Kontaminationen zu vermeiden. Abb. 15.1 gibt einen Überblick zu den Prozessschritten für die Fertigung von Elektroden.[2]

**Mischen/Dispergieren**
Im ersten Schritt werden die angelieferten Aktivmaterialien mit Bindern und eventuell auch mit Additiven in einem Trockenmischprozess vermengt. Danach wird Lösungsmittel hinzugegeben und nass dispergiert. Ziel des Misch- und Dispergierprozesses ist die Herstellung eines homogenen „Slurry" mit definierter Viskosität, Partikelgröße und -verteilung.

[1] Vgl. Kampker et al. 2013.
[2] Vgl. Korthauer 2013.

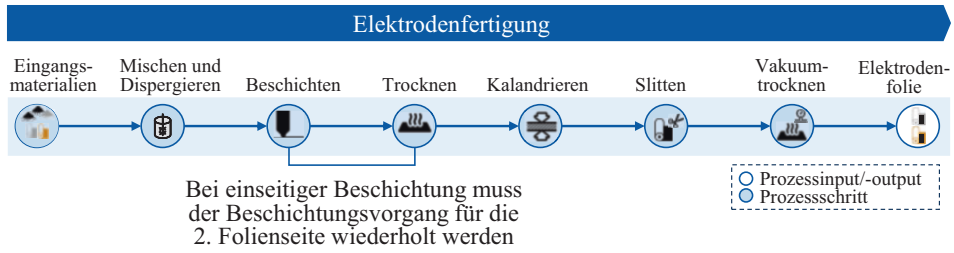


**Abb. 15.1** Prozesskette der Elektrodenfertigung

### Beschichten

Das Slurry wird anschließend mittels einer Pumpe zu einem Auftragswerkzeug gefördert. Als Auftragswerkzeug können verschiedene Technologien wie Schlitzdüsen oder Rakel eingesetzt werden. Das Slurry wird in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess mit Hilfe des Auftragswerkzeugs auf eine Stromableiterfolie gebracht. Relevante Parameter bei der Beschichtung sind unter anderem Scherkräfte, Schichtdicke und Kantengeometrie.

### Trocknen

In einem direkt angeschlossenen Trocknungsprozess wird das Lösungsmittel aus der Beschichtung evaporiert. Je nach Art des Lösungsmittels wird es abgeführt und aufgefangen oder in einem Wiedergewinnungsprozess aufbereitet. Nach dem Trocknungsprozess wird die beschichtete Stromableiterfolie wieder aufgewickelt. Der Beschichtungs- und Trocknungsprozess muss bei einseitiger Beschichtung für die andere Folienseite wiederholt werden. Bei einer simultanen doppelseitigen Beschichtung ist dies nicht notwendig.

### Kalandrieren

Das aufgetragene und getrocknete Aktivmaterial besitzt eine Porosität, die unter anderem durch den Lösungsmittelanteil, die Lösungsmittelverteilung und die Trocknung definiert wird. Aus diesem Grund wird die Beschichtung im Anschluss komprimiert, um eine für die elektrochemischen Eigenschaften gewünschte Porosität zu erzeugen. Dazu wird die beidseitig beschichtete Stromableiterfolie in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren einem Kalander zugeführt. Zur Vermeidung von Verunreinigungen wird die Beschichtungsoberfläche vorab gereinigt. Ein Kalander besteht aus mindestens zwei in der Regel beheizten Kalanderrollen, die einen definierten Liniendruck auf die Beschichtung ausüben.[3]

### Slitten

In einem weiteren Rolle-zu-Rolle-Verfahren werden die breiten Elektrodenbahnen in einem Längstrennungsprozess in mehrere schmalere Elektrodenbahnen geslittet. Dazu können rollierende Schneidmesser oder Laserschneidanlagen zum Einsatz kommen.

[3] Vgl. Schreiner et al. 2019.

**Vakuumtrocknen**
Die derart erzeugten schmalen Elektroden werden in Vakuumtrocknern platziert. Mittels Temperatur- und Druckanpassungen wird den Elektroden noch Restfeuchtigkeit entzogen, bevor sie in der Zellassemblierung weiterverwendet werden können.

### 15.1.2 Zellassemblierung

Die Zellassemblierung umfasst sämtliche Prozessschritte zur Herstellung einer Batteriezelle von den Anoden- und Kathodenfolien aus der Elektrodenfertigung bis zur (Teil-) Versiegelung des Batteriezellgehäuses. Die Prozessketten differenzieren sich stark je nach Batteriezellformat. Dabei wird zwischen Rundzellen, Pouch-Zellen und prismatischen Zellen unterschieden. Abb. 15.2 zeigt die unterschiedlichen Prozessketten der Zellformate. Im Folgenden wird die Zellassemblierung der Pouch-Zelle detaillierter vorgestellt und die Assemblierung der prismatischen und zylindrischen Zelle umrissen.

**Vereinzeln**
Anoden- und Kathodenfolien werden abgewickelt und in sogenannte Elektrodenblätter vereinzelt. Zur Vereinzelung können Stanzwerkzeuge oder Laserschneidanlagen eingesetzt werden. Wichtige Parameter sind vor allem die genaue Einhaltung der Schnittkantengeometrie sowie die Schnittkantenqualität.

**Stapeln**
Im Anschluss wird durch eine alternierende Anordnung von Anode, Separator und Kathode ein Zellstapel produziert. Zur Herstellung des Zellstapels können unterschiedliche Verfahren wie etwa das Einzelblattstapeln oder Z-Falten zum Einsatz kommen. Die Prozessqualität wird vor allem durch die Stapelgenauigkeit bestimmt.

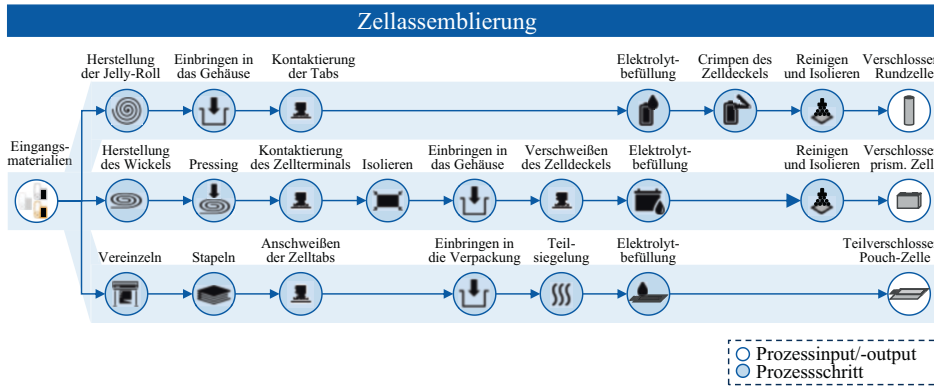


**Abb. 15.2** Prozesskette der Zellassemblierung

**Anschweißen der Zelltabs**
Die übereinanderliegenden, unbeschichteten Zellfahnen der Anoden- und Kathodenblätter werden gekürzt und jeweils mit einem sogenannten Tab verschweißt. Dadurch werden die jeweiligen Elektroden innerhalb des Zellstapels parallel miteinander verschaltet.

**Einbringen in die Verpackung und Teilsiegelung**
Der Zellstapel wird in eine tiefgezogene Pouch-Folie eingebracht und mit einer weiteren Pouch-Folie bedeckt. Im Anschluss werden drei Seiten der Zelle versiegelt. Dazu werden heiße Siegelbalken auf die übereinanderliegenden Pouch-Folien gepresst, die die Innenschichten der Pouch-Folien miteinander verschmelzen.

**Elektrolytbefüllung**
Über die verbliebene offene Seite wird der Elektrolyt in die Zelle eingebracht. Die gleichmäßige Benetzung des Elektrolyten, eine definierte Elektrolytmenge und eine extrem niedrige Luftfeuchtigkeit während der Befüllung sind die ausschlaggebenden Merkmale dieses Prozesses. Dazu wird eine hochgenaue Dosierlanze verwendet, die Zelle abwechselnd befüllt und mit einem definierten Druckprofil beaufschlagt. Dadurch werden die Kapillareffekte innerhalb der Zelle aktiviert.

**Vorläufige Versiegelung**
Nach der Befüllung wird die Zelle auf der verbliebenen offenen Seite versiegelt. Diese letzte Siegelnaht wird mit einigem Abstand zum Zellstapel vorgenommen, so dass sich ein verschlossener Hohlraum – die sogenannte Gastasche – innerhalb der Siegelnaht befindet, der im Laufe der Zellfinalisierung benötigt wird.

**Rundzelle**
Im Gegensatz zu einem Zellstapel wird für die Rundzelle eine sogenannte Jelly-Roll hergestellt. Dazu werden eine Anoden-, eine Kathoden- und zwei Separatorbahnen um einen Wickeldorn gewickelt. Die Elektroden werden vorab mit den Zell-Tabs verschweißt. Der Wickel wird mit Hilfe eines Klebestreifens fixiert und in das zylindrische Gehäuse eingebracht. Die beiden Tabs werden mit dem Gehäuse und dem Deckel verschweißt. Die Zelle wird mit Elektrolyt befüllt und der Deckel auf das Gehäuse gecrimpt. Anschließend wird die Zelle gereinigt und mittels einer Schutzfolie elektrisch isoliert.

**Prismatische Zelle**
In einer prismatischen Zelle kann entweder ein Zellstapel oder ein Flachwickel verwendet werden. Im Falle eines Flachwickels wird dieser nach dem Wickeln gepresst und die freien Elektrodenenden werden miteinander kontaktiert. Der Flachwickel wird an das Zellterminal und den Zelldeckel verschweißt. Der Flachwickel mit angeschweißtem Deckel wird isoliert und in das Gehäuse eingebracht, wonach der Zelldeckel mit dem Gehäuse verschweißt wird. Der Elektrolyt wird über eine Befüllöffnung im Zelldeckel eingefüllt. Danach wird die Öffnung durch einen Dorneinsatz verschlossen, die Zelle wird gereinigt und mit Hilfe einer Schutzfolie elektrisch isoliert. Die Befüllöffnung der prismatischen Zelle

wird meist nur temporär verschlossen, um im Nachgang an die Formierung das entstandene Gas zu entfernen und gegebenenfalls ein zweites Mal nach dem Pre-Charging (siehe den folgenden Abschn. 15.1.3) zu befüllen. Durch das Entgasen nach der Formierung wird Deformationen durch die Gasbildung entgegengewirkt.

### 15.1.3 Zellfinalisierung

Die Zellfinalisierung umfasst sämtliche Prozessschritte von der befüllten Zelle bis zur versandfertigen Zelle. Durch die hohe Abhängigkeit der bei der Zellfinalisierung stattfindenden chemischen Prozesse können die Herstellungsphasen im Gegensatz zu denen der Elektrodenfertigung und der Zellassemblierung in unterschiedlicher Reihenfolge, Häufigkeit und Dauer durchlaufen werden. Abb. 15.3 zeigt daher lediglich eine mögliche Prozesskette für jedes Zellformat.

**Vorbehandlung**
Der Benetzungsvorgang lässt sich durch das Press Rolling/Vibration und das Hochtemperatur-Soaking (HT-Soaking) beschleunigen. Diese Prozessschritte schließen sich an den Befüllvorgang der Zelle an. Beim „Press Rolling“ wird dabei ein definierter Druck mit Hilfe eines Walzenpaares auf die Pouch-Zelle appliziert. Dabei wird der Elektrolyt in die Poren gedrückt. Bei der prismatischen Zelle und bei der Rundzelle kann dieser Prozessschritt aufgrund des starren Gehäuses nicht vorgenommen werden. Bei diesen Zellen kann der Elektrolyt durch Vibration in die Poren eingebracht werden. Beim sogenannten HT-Soaking wird die Zelle auf rund 30 bis 40 °C erhitzt.[4] Durch die geringere Viskosität des Elektrolyten dringt dieser ebenfalls schneller in die Poren der Elektroden ein. Der Prozessschritt des HT-Soaking kann bei allen Zellformaten ausgeführt werden.

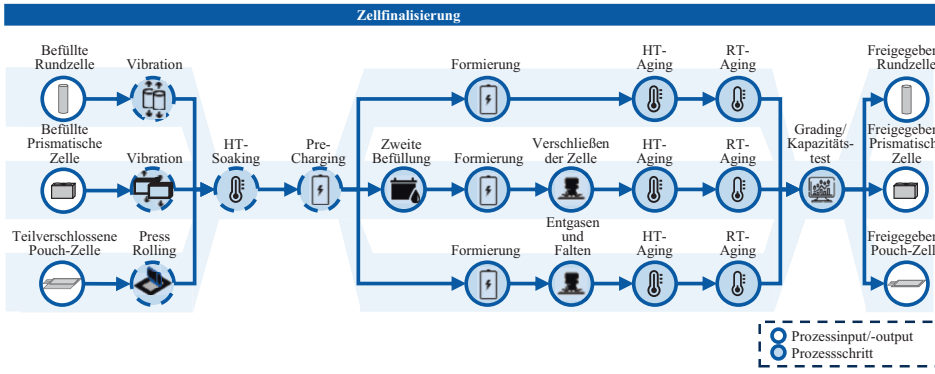


**Abb. 15.3** Mögliche Prozesskette der Zellfinalisierung

[4] Vgl. Mao et al. 2018.

**Pre-Charging**

Beim Pre-Charging-Prozess wird die Zelle mit einer geringen C-Rate bis etwa 1,5 V geladen.[5] Das dient dazu, eine mögliche Korrosion am Ableiter-Tab zu verhindern. Bei großformatigen Zellen (meist prismatische und Pouch-Zellen) kann der Pre-Charging-Prozess noch bis zu einem geringen „State of Charge" (SoC) weitergeführt und die Zelle im Anschluss entgast werden. Das hat den Vorteil, dass die Gase, die beim Pre-Charging entstehen, aus der Zelle entlassen werden können und somit die mechanische Belastung durch Druckentstehung innerhalb der Zelle bei der Formierung reduziert wird. Wird das während des Pre-Charging entstehende Gas nicht abgeführt, kann es zu Gaseinschlüssen im Elektrodenmaterial und Delamination der einzelnen Elektroden- und Separatorschichten kommen, was sich negativ auf die in der Formierung ausgebildeten Produkteigenschaften auswirken kann. Prismatische und Pouch-Zelle können im Anschluss noch ein weiteres Mal mit Elektrolyten befüllt werden, um die Verluste während der Formierung auszugleichen.

**Formierung**

Die Formierung bezeichnet den ersten kontrollierten Lade- und Entladevorgang einer Batteriezelle. Beim ersten Lade- und Entladezyklus wird die „Solid-Electrolyte-Interface" (SEI)-Schicht durch die Zersetzung des Elektrolyten an der Anode ausgebildet. Die ausgebildete SEI-Schicht ist abhängig von unterschiedlichen Einflussfaktoren – unter anderem von der C-Rate, der Temperatur und der Zyklenanzahl – und hat Einfluss auf die Lebensdauer, die Kapazität und die Sicherheit der Lithium-Ionen-Zelle. Der erste Ladezyklus beginnt bei einer geringen Stromstärke, damit die SEI-Schicht sich auf dem Graphit der Anoden sukzessiv und möglichst homogen formen kann. Die Ausbildung der SEI-Schicht ist in der Regel nach einem Zyklus bis maximal drei Ladezyklen vollständig abgeschlossen. Die Anzahl der aufeinanderfolgenden Zyklen, in denen die Stromstärke kontinuierlich gesteigert wird, ist vom jeweiligen Zellhersteller und den verwendeten Materialien abhängig. Die Formierung kann bis zu 24 h dauern und erfolgt entweder in einem Regal- oder einem Kammerkonzept.[6]

**Finales Verschließen der Zelle**

Das finale Verschließen der Zelle findet nur bei der Pouch-Zelle und bei der prismatischen Zelle statt, da die Rundzelle bereits vollständig vor der Zellfinalisierung verschlossen wurde. Bei der Pouch-Zelle wird zuerst durch das Einstechen der Gastasche mit einer Nadel das bei der Formierung entstandene Gas freigesetzt. Anschließend wird die offene Stelle erneut näher am Zell-Stack versiegelt. Das geschieht unter Vakuum, um das entstandene Gas aus der Zelle freizulassen sowie eine formstabile Zelle zu erhalten. Die Gastasche wird abgetrennt und als Sondermüll entsorgt. Zur Steigerung der volumetrischen Energiedichte werden die Siegelnähte gefaltet und geklebt. Bei der prismatischen Zelle wird die

[5] Vgl. An et al. 2017.

[6] Vgl. Sarah Michaelis et al. 2020.

Befüllöffnung mittels Laserschweißen geschlossen. Sollte schon eine Entgasung nach dem Pre-Charging Prozess stattgefunden haben, kann dieser Prozessschritt nach der Formierung entfallen.

**Aging**
Die Reifung, das sogenannte Aging, bezeichnet das Lagern der Batteriezelle nach der Formierung ohne weitere Stromzuführung. Der Zweck dieses Prozessschrittes ist die chemische Stabilisierung der Grenzschicht, die Sicherstellung der Funktionalität für den Langzeitbetrieb sowie die Qualitätssicherung. Zelleigenschaften werden durch eine regelmäßige Messung der Leerlaufspannung über einen Zeitraum von bis zu drei Wochen überwacht. Die Reifungsdauer ist abhängig von der Zellchemie und den Qualitätsanforderungen. Die Zellen durchlaufen dabei in der Regel zuerst ein Hochtemperatur (HT)- und anschließend ein Raumtemperatur (RT)-Aging. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal, das bei dem Prozess des Agings kontrolliert wird, ist die Selbstentladungsrate. Die Zellen werden zum Aging in Reiferegalen oder -türmen gelagert.[7]

**„End-of-Line"-Test**
Der letzte Prozessschritt der Batteriezellherstellung umfasst eine mechanische und elektrische Endkontrolle und wird als „End-of-Line" (EoL)-Test bezeichnet. Je nach Hersteller werden unter anderem Pulstests, Messungen des Innenwiderstands (DC) sowie der Selbstentladungsrate und der Kapazität, optische Inspektionen, OCV-Tests und Dichtheitstests vorgenommen. Die Batterien werden – basierend auf den Ergebnissen der unterschiedlichen Tests – in Leistungsklassen eingeteilt (Grading) beziehungsweise bei unzureichender Qualität aussortiert. Wenn die Prüfungen abgeschlossen sind und alle Tests erfolgreich bestanden wurden, können die Zellen verpackt und versendet werden.

## 15.2 Batteriemodul- und -packmontage

In diesem Kapitel wird die Montage von Batteriemodulen und Batteriepacks beziehungsweise Batteriesystemen vorgestellt. Dazu werden zunächst einige Grundlagen zu Modulen und Packs erläutert. Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen werden in der Regel mehrere Zellen zu einem Batteriemodul zusammengefasst. Dabei ist darauf zu achten, dass die ausgewählten Zellen eine möglichst gleiche Qualität aufweisen, da die schwächste Zelle die Performance – Leistung, Ladezeit und Lebensdauer – des gesamten Moduls bestimmt. Die Verschaltung der Zellen ist üblicherweise so ausgelegt, dass die Spannung des Moduls 60 V nicht überschreitet.[8] Grund dafür ist die erhöhte Gefährdung des Personals bei höheren Spannungsniveaus, weshalb eine besondere Schulung der Mitarbeitenden sowie umfassende Sicherheitsmaßnahmen erforderlich sind. Grundsätzlich unterscheiden sich Batteriemodule in ihrer Gestalt, Kühlung und Kontaktierung in Abhängigkeit vom eingesetzten Zellformat:

[7] Vgl. Duffner et al. 2021.
[8] Vgl. Kim et al. 2015.

- Pouch-Zellen können aufgrund ihres nicht formsteifen Gehäuses „atmen“. Um dies zu begrenzen, werden Pouch-Zellen für die Modulmontage verspannt. Die Verschaltung von Pouch-Zellenmodulen kann dabei über sogenannte U-Profile erfolgen. Außerdem besteht bei Pouch-Zellen die Möglichkeit, eine Kühlung in den Zellzwischenräumen zu realisieren.
- Rundzellen weisen eine besonders hohe Steifigkeit auf. Aus diesem Grund ist bei diesen Zellen keine Verspannung der Zellen notwendig. Ihre Positionierung und Fixierung erfolgt klassischerweise mit Zellhaltern, in die die Zellen eingesteckt werden. Die Kontaktierung lässt sich aufgrund der Position der beiden Pole über Deckel und Bodenplatte realisieren. Die Zwischenräume aufgrund der Zellgeometrie ermöglichen eine Kühlung an den Zellwänden.
- Prismatische Zellen werden in der Regel in Metall- oder Kunststoffgehäusen zunächst verklebt und anschließend zur Reduktion der Zellatmung verspannt. Der Kleber dient neben der Fixierung als thermischer und elektrischer Isolator. Als Material eignen sich dazu Polyurethane mit Elastomer-Eigenschaften. Die Kühlung prismatischer Zellen erfolgt über die Ober- oder Unterseite der Zellen.

Mehrere solcher Module werden im Anschluss zu einem Batteriepack verschaltet. Die Verschaltung erfolgt, abhängig von den Anforderungen an Spannung und Stromstärke, parallel oder in Serie. Neben den Modulen gehören zu einem Batteriepack weitere Komponenten, die die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Systems gewährleisten. Das können sowohl mechanische als auch elektrische und elektronische Bauteile sein.

### 15.2.1 Montageprozess des Moduls

Im Folgenden wird die Montage von Batteriemodulen in Abhängigkeit vom jeweiligen Zelltyp erläutert. Die Montage erfolgt in den fünf Schritten Vormontage (Eingangsprüfung, Reinigung, Stecken/Kleben/Stapeln), Verpressen, elektrische Kontaktierung (Auflegung des Busbars, Verschweißen/Fügen, Prüfen Schweißverbindung), Montage der Slave Platine und des Deckels (Anbringen Platinen & Sensoren, Montage Deckel) sowie der Endkontrolle (EoL-Tests), wie Abb. 15.4 zeigt.

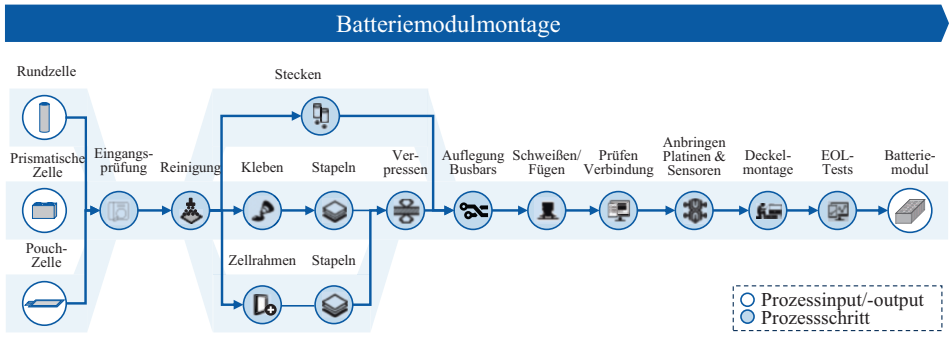


**Abb. 15.4** Montageprozess des Batteriemoduls

**Vormontage**
Im Rahmen der Vormontage werden die Zellen in einer Eingangskontrolle zunächst auf ihre Qualität geprüft. Dazu werden Eigenschaften wie Spannung, Innenwiderstand und Kapazität gemessen, und die Zellen werden klassifiziert oder im Extremfall aussortiert. Anschließend werden sie gereinigt. In Abhängigkeit vom Zellformat erfolgt die Montage mehrerer Zellen zu einer Einheit. Zylindrische Zellen werden dazu in einen Zellhalter gesteckt, während prismatische Zellen zu Stapeln verklebt werden. Der Kleber kann sowohl mit Hilfe einer Klebepistole als auch in Form von Klebestreifen aufgetragen werden. Pouch-Zellen hingegen werden aufgrund ihrer geringen Formsteifigkeit zunächst in Zellrahmen integriert und im Anschluss gestapelt. Wichtige Parameter bei der Vormontage sind die Positionsgenauigkeit und die Prozessgeschwindigkeit.

**Verspannung**
Prismatische Zellen sowie Pouch-Zellen werden im Anschluss an die Vormontage verspannt. Optional kann außerdem eine elektrische Isolation erfolgen. Dazu werden Kunststoffplatten oder Folien an den Seiten des Zellstapels montiert, die den Stapel im Falle eines Kurzschlusses gegenüber dem Gehäuse isolieren. Für die Verspannung werden die Zellstapel mittels Spannvorrichtung, Bandage oder durch den Modulkörper verpresst, bevor sie in das Gehäuse eingesetzt werden.

**Elektrische Kontaktierung**
Für die elektrische Kontaktierung werden zunächst starre Leiter, sogenannte Busbars, auf die Zellstapel gelegt. Anschließend können diese mit Hilfe verschiedener Fügetechnologien mit den Zellen verbunden werden. Zur Auswahl stehen Laser-, Ultraschall- oder Widerstandsschweißen. Die Technologien weisen dabei unterschiedliche Vorzüge und Nachteile auf. Insbesondere Ultraschall und Laserschweißen werden in der Industrie verstärkt für die Zellkontaktierung verwendet. Laserbasierte Systeme bieten dabei die Vorteile einer hohen Flexibilität und geringer Kontaktwiderstände bei gleichzeitig hoher mechanischer Stabilität. Eine alternative Kontaktierungstechnologie, die bei Rundzellen zum Einsatz kommt, stellt das Drahtbonden dar. Diese Methode kann sowohl laser- als auch ultraschallbasiert ausgeführt werden. Die Verbindung zwischen Zellenstromsammler und Zelle wird dabei durch einen Draht realisiert, der an beiden Enden angeschweißt wird. Abgeschlossen wird der Prozessschritt durch eine optische Kontrolle der Schweißnähte beziehungsweise -punkte.[9]

**Montage Slave-Platine und Deckel**
Auf die Kontaktierung folgt die Montage von Slave-Platine und Schlussplatte. Die BMS-Slave-Platine wird per Schweiß- oder Schraubverfahren am Modul befestigt. Anschließend wird die Verknüpfung von Zellen und BMS mittels Schweiß- oder Steckverbindung vorgenommen. Außerdem werden Temperatursensoren in das Modul eingeklebt, das anschließend verkabelt wird, wonach wiederum der Deckel mittels Verschraubung oder Clips montiert wird.

[9] Vgl. Zwicker et al. 2020.

**Endkontrolle**
Abschließend wird eine Endkontrolle vorgenommen. Im Rahmen dieses Tests werden Toleranzen geprüft, Software installiert, Zell-Balancing ausgeführt, der SoC eingestellt und der elektrische Widerstand geprüft.

### 15.2.2 Montageprozess des Packs

In diesem Abschnitt wird die Montage der Batteriemodule zu fertigen Batteriepacks vorgestellt. Der Prozess kann in sechs Hauptschritte eingeteilt werden: Einsatz der Zellmodule (Vormontage und Einsetzen der Module), Befestigung der Module, elektrische und thermische Integration (Einsetzen von Elektronik und Kühlsystem, Verkabelung/Kontaktierung), Verschließen und Dichtheitstest (Deckelmontage und Dichtheitsprüfung), Laden und Flashen (Laden des Systems und Flashen) sowie Endkontrolle (EoL-Tests). Abb. 15.5 verdeutlicht die einzelnen Schritte.

**Einsatz der Zellmodule**
Im ersten Schritt werden Kühl- und Heizplatten im Batteriepackgehäuse montiert. Danach werden die Batteriemodule entpackt und in das Batteriegehäuse eingesetzt.

**Befestigung der Module**
Anschließend werden die Module beispielsweise mittels Verschraubung am Systemgehäuse fixiert. Dadurch wird die Steifigkeit erhöht und ein erhöhter Schutz der Module vor Vibrationen gewährleistet.

**Elektrische und thermische Integration**
Nach der Befestigung der Module erfolgt im Schritt der elektrischen und thermischen Integration die Montage von Kühlsystem, Batteriemanagementsystem (BMS) und Hochvoltmodul. Das Master-BMS sowie das Hochvoltmodul werden anschließend mit den Slave-BMS der Batteriemodule verkabelt. Außerdem wird das Kühlsystem an die Kühlelemente angeschlossen, und es werden die fahrzeugseitigen Anschlüsse des Batteriesystems – unter anderem Kühlkreislauf und Kabel – montiert. Eine Besonderheit in diesem

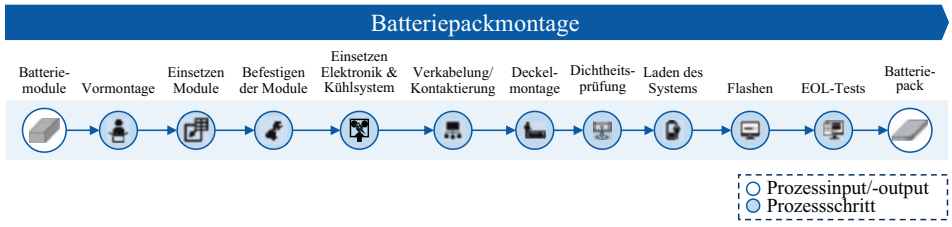


**Abb. 15.5** Montageprozess des Batteriepacks

Prozessschritt stellt die manuelle Montage der Hochvoltkabel in einem ansonsten hochautomatisierten Prozess dar. Die Ursache dafür liegt in der anspruchsvollen Handhabung der biegeschlaffen Kabel.

**Verschließen und Dichtheitstest**
In diesem Prozessschritt wird das Pack mit Hilfe eines Deckels verschlossen und verschraubt. Zur Abdichtung wird zuvor eine Dichtschnur oder eine geklebte Dichtung aufgetragen. Der Deckel ist zur Sicherheit mit einer Berstscheibe ausgestattet, die im Falle einer Fehlfunktion mit Gasentwicklung bricht und so einen kontrollierten Druckabbau ermöglicht. Um eine Beschädigung zu verhindern, erfolgt die Montage der Berstscheibe nach der anschließenden Dichtheitsprüfung. Zum Schluss werden eine Dichtheitsprüfung des Packs und ein Leckage-Test des Kühlsystems mittels Gasprüfung vorgenommen.

**Laden und Flashen**
Kongruent zur Modulmontage wird im Prozessschritt „Laden und Flashen" zunächst das BMS geflasht und anschließend die aktuelle Software installiert. Die Funktion der Software wird überprüft und das Batteriesystem bis zu einem gleichmäßigen Ladezustand der Zellen (Cell balancing) geladen. In manchen Fällen wird zusätzlich die Funktion des Thermomanagementsystems mittels thermografischem Messsystem überprüft.

**Endkontrolle**
Als letzter Schritt in der Packmontage erfolgt die „End-of-Line"-Prüfung, in deren Rahmen eine optische und technische Prüfung des Systems vorgenommen wird. Dazu gehört auch eine Funktionsprüfung von BMS und Thermomanagement sowie eine Leistungsprüfung mittels Be- und Entladung. Das System wird anschließend auf einen gewünschten SoC geladen und gelabelt. Nach der Anbringung von Warnhinweisen kann das System verpackt werden.

## 15.3 Die Zukunft der Batterieproduktion

In den kommenden Jahren ist zu erwarten, dass sämtliche Prozessschritte der Batteriezellproduktion von der Elektrodenfertigung über die Zellassemblierung bis hin zur Formierung stetig weiterentwickelt werden. Dabei bieten vor allem das Beschichten und Trocknen sowie die Formierung große Optimierungspotenziale mit Blick auf die Fertigungskosten und den Energieverbrauch.[10] Darüber hinaus sind Neuerungen in der Batteriemodul- und Batteriepackmontage zu erwarten.

[10] Vgl. Liu et al. 2021, S. 4.

**Elektrodenfertigung**
Da die Trocknung und Rückgewinnung der Lösungsmittel sehr kostenintensiv und teilweise umweltschädlich sind, wird angestrebt, derzeit verwendete Lösungsmittel durch Wasser zu ersetzen. Parallel dazu stehen weitere Ansätze in der Diskussion, die es erlauben, die Menge erforderlicher Lösungsmittel zu verringern. Dadurch lassen sich die benötigte Energie und die notwendige Zeit zum Trocknen reduzieren. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass das Mischen in einem kontinuierlichen Prozess geschieht. Dies hat zum Ergebnis, dass der Fertigungsprozess effizienter ausgelegt werden kann und somit höhere Fertigungsdurchsätze erzielbar sind. Bei der Trocknung kann künftig auf neue, effizientere Trockenverfahren wie Infrarot-, Mikrowellen-, und Lasertrocknung zurückgegriffen werden. Vor allem in Kombination mit geringen Lösemittelanteilen im Slurry ist absehbar, dass diese Technologien Potenziale zur Energieeinsparung bereitstellen. Darüber hinaus erfordern sie tendenziell geringere Bauräume als herkömmliche konventionelle Konvektionstrocknung – bei gleichem oder gesteigertem Fertigungsdurchsatz. Eine weitere Reduktion des Lösemittelanteils im Slurry führt schließlich zum Verfahren der Trockenbeschichtung.[11] Erste Erfolge dazu werden von OEMs bereits kommuniziert.[12] Die Bestandteile der Beschichtung werden dabei als vorgemischtes Pulver auf die Stromableiterfolie gebracht und dann durch das Kalandrieren fixiert.[13]

**Zellassemblierung**
Die Kombination neuer, kontinuierlicher Zellassemblierungsprozesse wird die Effizienz einer Zellproduktionslinie deutlich steigern können. Als Beispiel sei das kontinuierliche Z-Falten erwähnt.[14]

**Zellfinalisierung**
Im Bereich der Zellfinalisierung besteht hohes Potenzial durch die Minderung von Investitionskos- und Energiekosten sowie der Reduzierung der Formierdauer durch das Einbringen künstlicher „Solid-Electrolyte-Interface“ (SEI)-Beschichtungen.[15] Auch ist zu erwarten, dass durch KI-gestützte Messtechnologien Prozesszeiten der Formierung und des Aging signifikant reduzieren werden können.

**Neue Batteriezell-Prozesstechnologien**
Mit der additiven Zellfertigung und dem 3-D-Druck von Batteriezellen werden zusätzlich vollkommen neue Produktionsverfahren auf den Markt kommen. Derzeit werden diese vor allem für die Produktion von Feststoffbatterien erforscht. Vereinzelt finden Lösungen be-

[11] Vgl. Hutchkins 06. September, 2021.
[12] Vgl. Tesla 2020.
[13] Vgl. Liu et al. 2021, S. 5ff.; Vgl. Kwade et al. 2018, S. 298.
[14] Vgl. Kwade et al. 2018, S. 298.
[15] Vgl. Liu et al. 2021, S. 11.

reits im Pilotlinienmaßstab Anwendung.[16], [17] Es ist jedoch davon auszugehen, dass sie vorerst nur im Bereich der Forschung, Prototypenfertigung sowie für Spezialanwendungen zum Einsatz kommen werden.

**Neuerungen in Batteriemodul- und Batteriepackmontage**
Die Weiterentwicklung prozesstechnischer Lösungen für die Montage von Batteriemodulen und Batteriepacks für Elektrofahrzeuge wird in den kommenden Jahren voraussichtlich vom Trend des „Cell-to-Pack"-Ansatzes beeinflusst werden. Diese Innovation soll durch den Verzicht auf das Batteriemodul einige Vorteile hinsichtlich geringeren Materialeinsatzes, günstigerer Materialien und reduzierter Fertigungsaufwände sowie hoher Automatisierungsgrade bei mindestens gleichbleibender Produktqualität und Fertigungskosten ermöglichen.[18] Durch diese Maßnahme können ein Großteil der im Abschn. „Modulmontage" beschriebenen Komponenten sowie die zugehörigen Montageschritte eingespart werden. Gleichzeitig wird das Gewicht des Batteriepacks reduziert und die Energiedichte erhöht.[19]

Neben dem „Cell-to-Pack"-Ansatz existieren weitere Bestrebungen, von der Flexibilität des Batteriemoduls Gebrauch zu machen. Ein Ansatz ist die Standardisierung von Batteriemodulen mit Hilfe von Baukastensystemen, die signifikante Kostenreduktionen erlauben sollen. Durch den Einsatz baugleicher Module in unterschiedlicher Anzahl pro Fahrzeug können verschiedene Fahrzeugklassen und Reichweitenoptionen realisiert werden. Infolge von Skaleneffekten lassen sich die Gesamtkosten für das Batteriesystem senken.

## Literatur

### Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

**An, S. J; Li, J; Du, Z; Daniel, C; Wood, D. L.**: *Fast formation cycling for lithium ion batteries*. In: Journal of Power Sources, Jg. 342, 2017, S. 846–852

**Blackstone Resources**: *Blackstone Resources – Battery Technology*. https://www.blackstoneresources.ch/activities/battery-technology/. Abruf 04.11.2021

**Duffner, F; Kronemeyer, N; Tübke, J; Leker, J; Winter, M; Schmuch, R.**: *Post-lithium-ion battery cell production and its compatibility with lithium-ion cell production infrastructure*. In: Nat Energy, Jg. 6, 2021, Nr. 2, S. 123–134

**Hutchkins, M.A:***A new spin on battery manufacturing*. In: pv magazine, 06. September, 2021

**Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A.**: *Elektromobilität*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013

**Kim, H; Oh, S.-M; Scrosati, B; Sun, Y.-K.**: *High-performance electrode materials for lithium-ion batteries for electric vehicles*: Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles Elsevier, 2015, S. 191–241

[16] Vgl. Sher 2021.

[17] Vgl. Blackstone Resources 2021.

[18] Vgl. Pampel et al. 2022.

[19] Vgl. Löbberding et al. 2020.

**Korthauer, R.**: *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013

**Kwade, A; Haselrieder, W; Leithoff, R; Modlinger, A; Dietrich, F; Droeder, K.:** *Current status and challenges for automotive battery production technologies*. In: Nat Energy, Jg. 3, 2018, Nr. 4, S. 290–300

**Liu, Y; Zhang, R; Wang, J; Wang, Y.:***Current and future lithium-ion battery manufacturing*. In: iScience, Jg. 24, 2021, Nr. 4, S. 102332

**Löbberding, H; Wessel, S; Offermanns, C; Kehrer, M; Rother, J; Heimes, H; Kampker, A.**: *From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types*. In: WEVJ, Jg. 11, 2020, Nr. 4, S. 77

**Mao, C; An, S. J; Meyer, H. M; Li, J; Wood, M; Ruther, R. E; Wood, D. L.**: *Balancing formation time and electrochemical performance of high energy lithium-ion batteries*. In: Journal of Power Sources, Jg. 402, 2018, S. 107–115

**Pampel, F; Pischinger, S; Teuber, M.**: *A systematic comparison of the packing density of battery cell-to-pack concepts at different degrees of implementation*. In: Results in Engineering, Jg. 13, 2022, S. 100310

**Sarah Michaelis; Ehsan Rahimzel; Achim Kampker; Heiner Heimes: Christian Offermanns; Marc Locke; Hendrik Löbberding; Sarah Wennemar; Axel Thielmann; Tim Hettesheimer; Christoph Neef; Arno Kwade; Wolfgang Haselrieder; Steffen Biomerke; Stefan Doose; Nicolas von Drachenfels; Robin Drees; Arian Fröhlich; Laura Gottschalk; Louisa Hoffmann; Maher Kouli; Ruben Leithoff; Sina Rahls; Julian Rickert; Lars Oliver Schmidt; Alexander Schoo; Matthias Thomitzek; Artem Turetskyy; Filip Vysoudil**: *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2020*. Frankfurt am Main, 2020

**Schreiner, D; Oguntke, M; Günther, T; Reinhart, G.**: *Modelling of the Calendering Process of NMC-622 Cathodes in Battery Production Analyzing Machine/Material–Process–Structure Correlations*. In: Energy Technol., Jg. 7, 2019, Nr. 11, S. 1900840

**Sher, D.:** *Blackstone develops 3D printed solid-state batteries with an eye on Tesla*. In: 3D Printing Media Network, 22.01.2021

**Tesla:** *2020 Annual Meeting of Stockholders and Battery Day|Tesla*. https://www.tesla.com/de_de/2020shareholdermeeting. Abruf 15.05.2021

**Zwicker, M; Moghadam, M; Zhang, W; Nielsen, C. V.**: *Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining*. In: Journal of Advanced Joining Processes, Jg. 1, 2020, S. 100017

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.