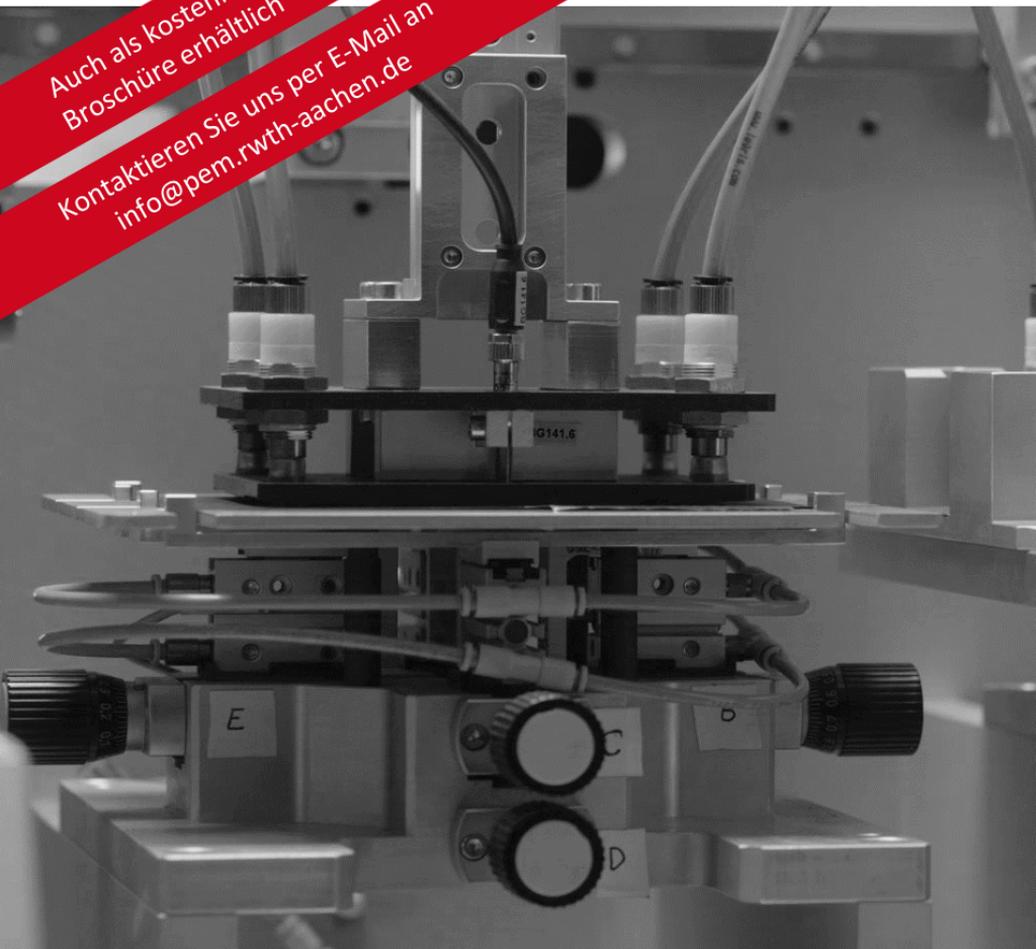


Auch als kostenlose
Broschüre erhältlich
Kontaktieren Sie uns per E-Mail an
info@pem.rwth-aachen.de



PRODUKTION EINER ALL-SOLID-STATE- BATTERIEZELLE



RWTHAACHEN
UNIVERSITY



Batterieproduktion



Der Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen forscht seit vielen Jahren zur Lithium-Ionen-Batterieproduktion. Das Themenfeld erstreckt sich dabei vom Automotive-Bereich bis hin zu stationären Anwendungen. Durch die Teilnahme an zahlreichen nationalen und internationalen Industrieprojekten in Unternehmen aller Wertschöpfungsstufen sowie dank Schlüsselpositionen in renommierten Forschungsprojekten bietet PEM weitreichende Expertise.

Sind Sie auf der Suche nach starken Lösungen für die Batterieproduktion? Möchten Sie eine Produktionslinie aufbauen oder halten Sie nach einem Partner für die Prozessentwicklung Ausschau?

Unsere neue Übersicht darüber, welche Unternehmen welche Technologien entlang der Prozesskette anbieten, hilft Ihnen, die richtigen Partner zu finden.

Besuchen Sie uns: <https://vdma-branchenfuehrer.de/batterieproduktion>



PEM

Production Engineering of E-Mobility Components of RWTH Aachen University
Bohr 12
52072 Aachen

www.pem.rwth-aachen.de



VDMA

Batterieproduktion
Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

<https://vdma.org/batterieproduktionsmittel>

Autor*innen

PEM der RWTH Aachen



Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Heiner Hans Heimes
Geschäftsführender Oberingenieur
H.Heimes@pem.rwth-aachen.de



Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker
Lehrstuhlinhaber
A.Kampker@pem.rwth-aachen.de



Sarah Wennemar, M. Sc. M. Sc.
Gruppenleiterin Battery Production Technology
S.Wennemar@pem.rwth-aachen.de



Artur Scheibe, M. Sc.
Battery Production Technology
A.Scheibe@pem.rwth-aachen.de



Jan Felix Plumeyer, M. Sc.
Battery Production Technology
J.Plumeyer@pem.rwth-aachen.de

VDMA



Dr. Sarah Michaelis
Leitung VDMA Batterieproduktion
Sarah.Michaelis@vdma.org



Jörg Schütrumpf
Projektleitung VDMA Batterieproduktion
Jörg.Schütrumpf@vdma.org



Haben Sie Fragen?



Sprechen Sie uns an!

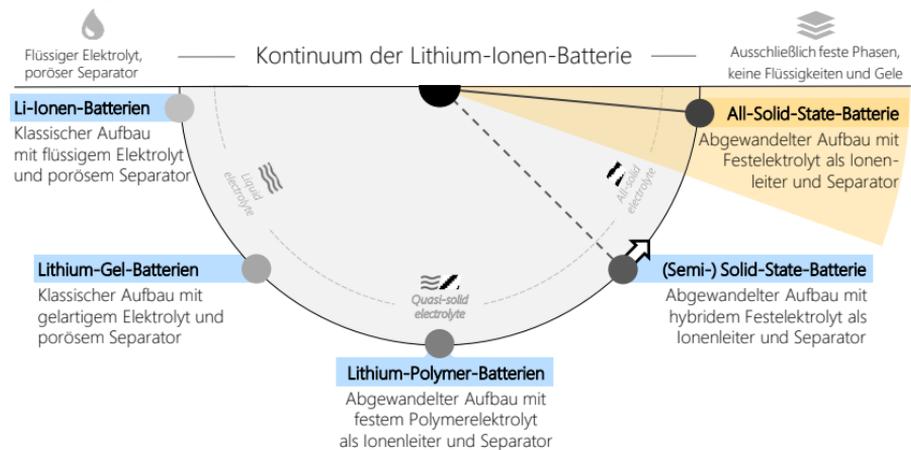
All-Solid-State-Batterie

Wie sieht die Zukunft der Batterie aus?

Höhere Energie- und Leistungsdichte, längere Lebensdauer, gesteigerte Sicherheit und deutlich reduzierte Kosten: So lautet die **Idealvorstellung künftiger Batterietechnologien**. Mit ihrem Eigenschaftsprofil verspricht dabei insbesondere die Festkörperbatterie (englisch: „All-Solid-State-Battery“), in gleich mehreren Dimensionen **neue Maßstäbe zu setzen**.

Auf dem Weg zum ausgereiften und in verschiedenen Endprodukten einsetzbaren Energiespeicher, steht die Festkörperbatterie – trotz **beträchtlicher Fortschritte** – nach wie vor einigen **Herausforderungen** gegenüber. Sie lassen sich in **produkt- und prozessbezogene Handlungsfelder** unterteilen und werden im Rahmen der gegenwärtigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gezielt adressiert.

Ausgehend von der klassischen Lithium-Ionen-Batterie, gestaltet sich dabei der **Entwicklungspfad hin zur Festkörperbatterie** durch einen fortlaufenden **Wandel der Zellstruktur** und der für ihre Herstellung eingesetzten **Produktionstechnologien**.



Potentiale



Hohe Energiedichten durch den Einsatz reiner Lithium-Anoden



Minimiertes Explosions- und Brandrisiko durch Entfall des flüssigen Elektrolyten



Verkürzte Ladezeiten durch hohe Leistungsdichte



Weites Betriebsfenster im Temperaturbereich von -30 °C bis +100 °C

Herausforderungen



Hohe Grenzflächenwiderstände zwischen den festen Phasen



Mangelnde Kompatibilität zwischen Festelektrolyt und Elektrodenmaterialien



Fehlende Fertigungsverfahren für die Serienproduktion



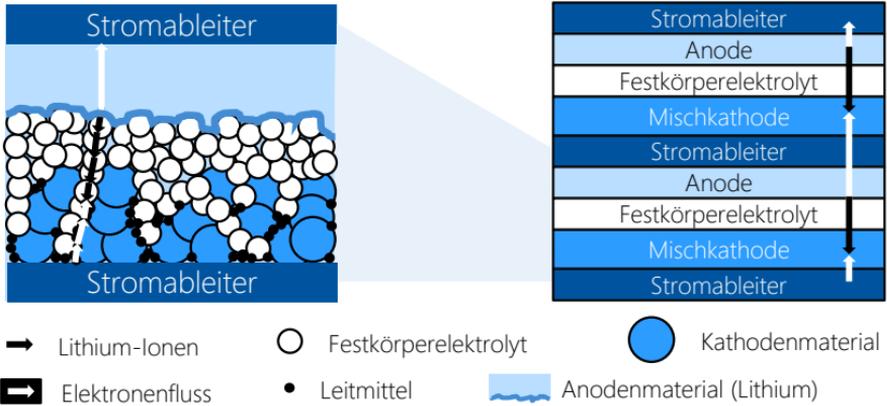
Hohe Produktionskosten für Wettbewerbsfähigkeit

Diese Broschüre legt den Fokus auf die Produktion der All-Solid-State-Batterie und gibt erste Antworten auf Fragen nach Veränderungen im Fertigungsprozess.

Aufbau & Funktionsprinzip

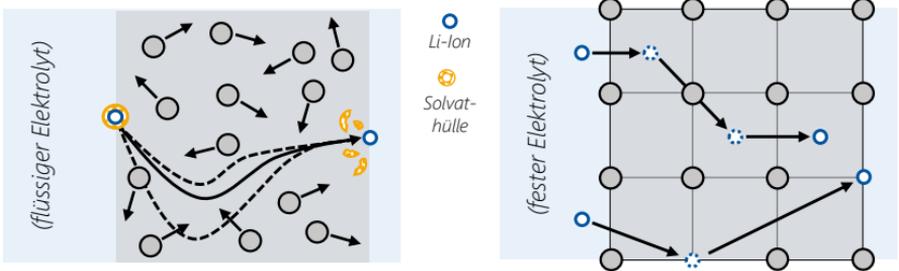
einer All-Solid-State-Batterie

Aufbau einer Festkörperbatterie



- Grundsätzlich sind für Festkörperbatterien verschiedene Zelldesigns möglich. Die obenstehende Abbildung zeigt schematisch den **Grundaufbau einer Festkörperbatterie** mit **Mischkathode** und reiner **Lithium-Metall-Anode**.
- Innerhalb der All-Solid-State-Batterie übernimmt dabei ein für Ionen durchlässiger **Festkörperelektrolyt** sowohl die räumliche als auch die elektrische Trennung zwischen Kathode und Anode. Zugleich fungiert er als isolierender Separator zwischen den beiden Elektroden.
- Mit dem Einsatz eines festen Elektrolyten ergibt sich zudem die Möglichkeit einer **bipolaren Stapelung**, die durch eine **serielle Verschaltung einzelner Monozellen** gekennzeichnet ist.
- Abhängig von der Anzahl gestapelter Monozellen, sind dadurch bereits auf Zellebene **deutlich höhere Spannungen** als bisher möglich.

Funktionsprinzip einer Festkörperbatterie



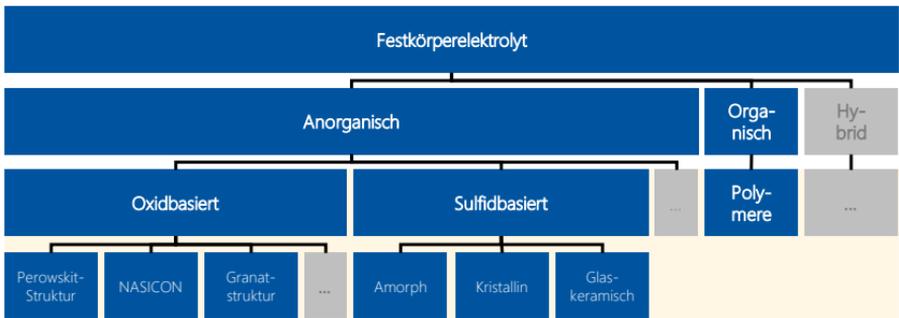
- Beim **Entladevorgang** einer All-Solid-State-Batterie bewegen sich die Lithium-Ionen von der Anode durch den festen Elektrolyten zur Kathode. Gleichzeitig fließt über den geschlossenen äußeren Stromkreislauf ein Strom.
- **Frei-/Fehlstellen innerhalb einer vorgegebenen Gitterstruktur** ermöglichen dabei den Lithium-Ionen-Transport im Inneren der Festkörperbatterie.

Materialien

einer All-Solid-State-Batterie

Festkörperelektrolyt

- Festkörperelektrolyte können in **organische und anorganische Elektrolyte** unterteilt werden. Auf die anorganischen Elektrolyte entfallen typischerweise **oxid- und sulfidbasierte Elektrolyte**. Sie bieten Vorteile in der Sicherheit, da sie weder entflammbar sind noch toxische Materialien beinhalten.
- Unter den **organischen Elektrolyten** werden **Polymere und Polymer/Keramik-Verbundwerkstoffe** zusammengefasst. Letztgenannte versuchen, die Vorteile der anorganischen und organischen Elektrolyte gezielt miteinander zu kombinieren.



Sulfidbasiert

- Die sulfidbasierten Elektrolyte können in **kristalline, amorphe** sowie **glaskeramische Phasen** unterteilt werden.
- Sie verfügen über eine **hohe Ionenleitfähigkeit** und Verformbarkeit, weshalb sie mehrere Vorteile bieten.
- Der größte Nachteil sulfidbasierter Festkörperelektrolyte findet sich in der **begrenzten Stabilität** gegenüber der **Lithium-Anode** und den **Kathodenmaterialien** sowie einer ausgeprägten **Reaktivität** bei **normaler Atmosphäre** (Bildung von toxischem H_2S).

Oxidbasiert

- Oxid-basierte Elektrolyte verfügen über ein **breites elektrochemisches Stabilitätsfenster** und sind weniger reaktiv als Sulfidbasierte Elektrolyte.

- Die hohe **Härte und Verformungsstabilität** oxidbasierter Elektrolyte trägt dazu bei, die Ausbildung und das Wachstum von Dendriten zu unterbinden.
- Die **Ionenleitfähigkeit** ist jedoch häufig deutlich **niedriger** als bei **sulfidbasierten Elektrolyten**.

Polymerbasiert

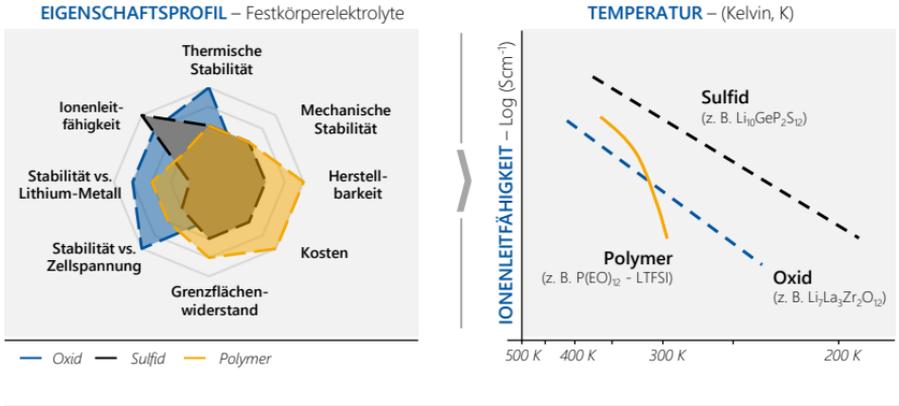
- Polymerbasierte Festelektrolyte bestehen aus einer **leitfähigen Polymermatrix**, in der ein für Lithium-Ionen leitfähiges Lithiumsalz enthalten ist.
- Sie verfügen über eine **hohe Verformbarkeit**, die sich für die Ausbildung der Grenzflächenkontakte zu den Elektroden als besonders günstig erweist.
- Die größten Nachteile sind die **niedrige Ionenleitfähigkeit bei Raumtemperatur**, die **mangelnde Temperaturstabilität** und das **eingeschränkte elektrochemische Stabilitätsfenster**.

Materialien

einer All-Solid-State-Batterie

Vergleich der Festkörperelektrolyte

- Der direkte Vergleich der Festelektrolytklassen verdeutlicht die unterschiedlichen Eigenschaftsprofile und zeigt die für die weitere Optimierung relevanten Entwicklungsfelder auf.



Anodenmaterialien für die Festkörperbatterie

- **Graphite** oder auch **Lithiumtitanate** stellen typische Anodenmaterialien dar, die auch in der Festkörperbatterie zum Einsatz kommen können.
- Das Hauptaugenmerk bei der Realisierung von Festkörperbatterien liegt auf der Verwendung **reiner Lithium-Metall-Anoden** (Fokus der Prozessdarstellung), die aufgrund ihrer hohen spezifischen Kapazität die **höchsten Energiedichten** versprechen.
- Als Anodenmaterial eingesetzt, neigt Lithium-Metall allerdings zur **Dendritenbildung**, was durch den Einsatz des Festkörperelektrolyten nur teilweise unterbunden werden kann. Zudem ist eine Handhabung unter inerte Atmosphäre notwendig, da sich ansonsten unmittelbar eine **passivierende Oberflächenschicht** ausbildet.
- Eine Alternative stellt die **Verwendung von Silizium** dar, das ebenfalls **gesteigerte Energiedichten** ermöglicht, jedoch die Herausforderung massiver **Volumenänderungen** im Betrieb mit sich bringt.

Kathodenmaterialien für die Festkörperbatterie

- Metalloxide wie **Nickel-Mangan-Cobalt (NMC)-Verbindungen** oder **Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)** sind typische Kathodenmaterialien, die auch in der Festkörperbatterie zum Einsatz kommen können.
- Abweichend von der herkömmlichen Kathodenformulierung, wird dabei für die Festkörperbatterie das **Aktivmaterial mit dem Festelektrolyten vermengt**. Häufig auch als „**Katholyt**“ bezeichnet, ist diese neue Elektrodenzusammensetzung notwendig, um auch im inneren der Elektrode eine **ausreichende Ionenleitfähigkeit** sicherzustellen.

Produktionsprozess

einer All-Solid-State-Batterie

Hauptabschnitte in der Herstellung von Festkörperbatterien

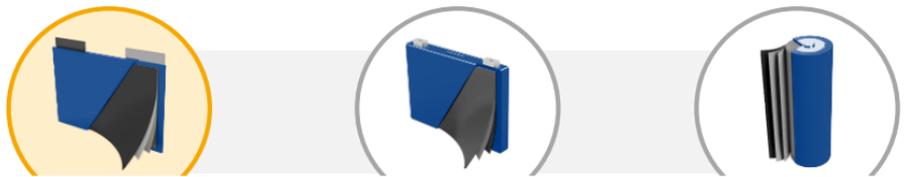
- Die Fertigung einer All-Solid-State-Batterie lässt sich übergeordnet in die drei Hauptabschnitte **Elektroden- und Elektrolytfertigung**, **Zellassemblierung** und **Zellfinalisierung** einteilen.
- Der Hauptabschnitt der Elektroden- und Elektrolytfertigung umfasst dabei die **Anoden-, Katholyt- bzw. Mischkathoden- und Elektrolytfertigung**.



Prozessketten in der Herstellung von Festkörperbatterien

- Eine etablierte Prozesskette zur Herstellung von Festkörperbatterien existiert bislang nicht. Vielmehr kann eine **Vielzahl unterschiedlicher Fertigungsverfahren** zum Einsatz kommen. **Erforderliche Produktionsumfänge** und **eingesetzte Verfahren** sind dabei in erster Linie abhängig von dem verarbeiteten Festkörperelektrolyt.
- Im Rahmen dieser Broschüre wird für jede der **drei betrachteten Elektrolytklassen** (oxidbasiert, sulfidbasiert und polymerbasiert) jeweils eine **vollständige und zusammenhängende Prozesskette** betrachtet. Sie orientieren sich an einer **skalierten Produktion im Pilotlinien- bzw. Serienmaßstab** und legen beim Zellformat eine **Pouchzelle** zugrunde.

Zellformate für die Herstellung von Festkörperbatterien



Pouchzelle

Prism. Zelle

Rundzelle

Stapelungen sind für die Herstellung von Festkörperbatterien vorteilhaft, da die Elektrolytschichten in diesem Fall nicht zusätzlich verformt und kritischen Beanspruchungen ausgesetzt werden. Der Zellstapel kann anschließend mit einer externen Kraft verpresst werden.

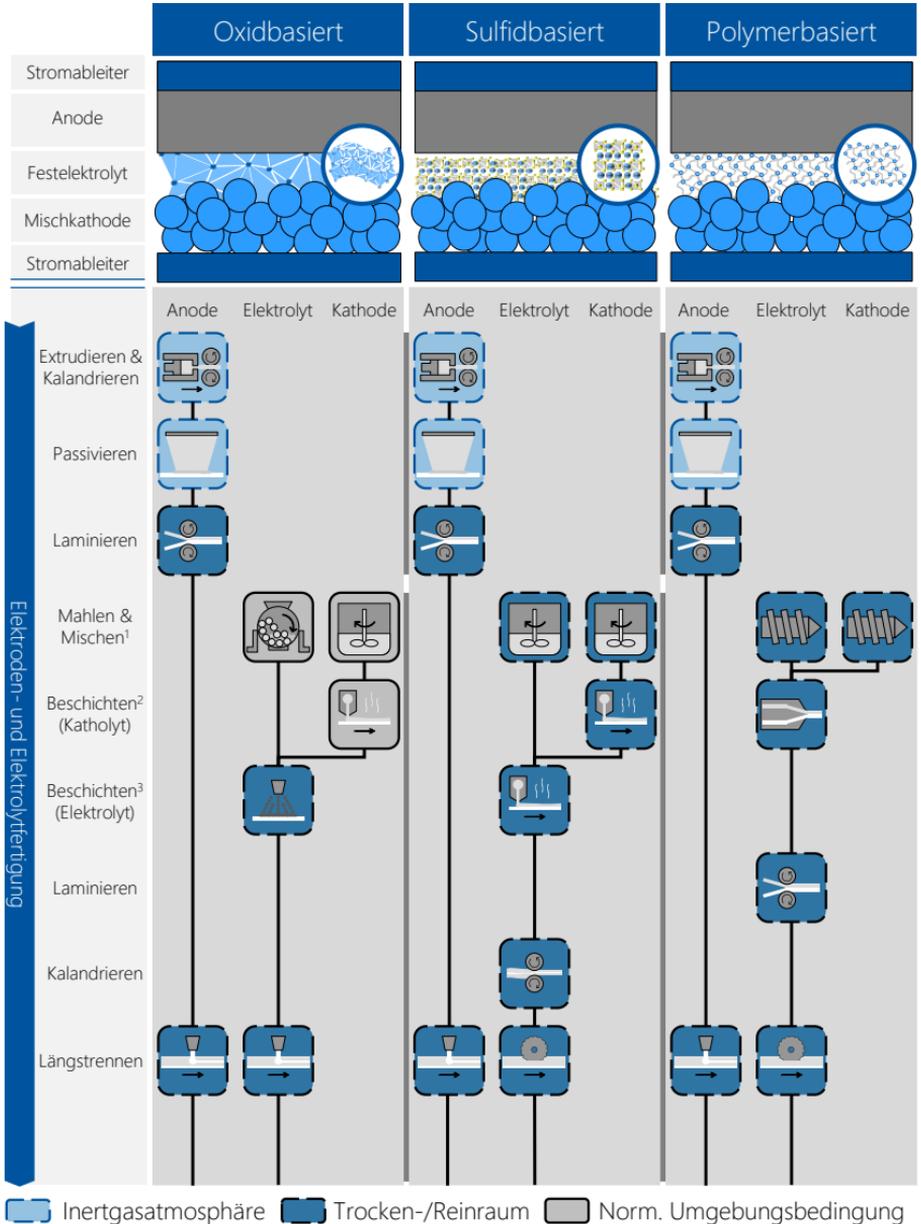
Wicklungen bzw. „Jelly rolls“ sind aufgrund der festen Bestandteile der All-Solid-State-Batterie kaum möglich und insofern mit wesentlichen Herausforderungen verbunden. Für einige Elektrolytklassen – wie etwa die spröden Oxidkeramiken – sind Wicklungen nicht defektfrei zu realisieren.

Nachfolgend aufgezeigte Prozessketten und Technologiesteckbriefe vermitteln einen Überblick zur skalierten Produktion von Festkörperbatterien.

Produktionsprozess

Elektrolytspezifische Prozessübersicht

- In der **Elektrodenfertigung** wird der **Verbund aus Kathode, Elektrolyt und Anode** hergestellt.
- Zentrales **Differenzierungsmerkmal** der verschiedenen Festkörperbatterien ist die **Herstellung des Festkörperelektrolyten**:



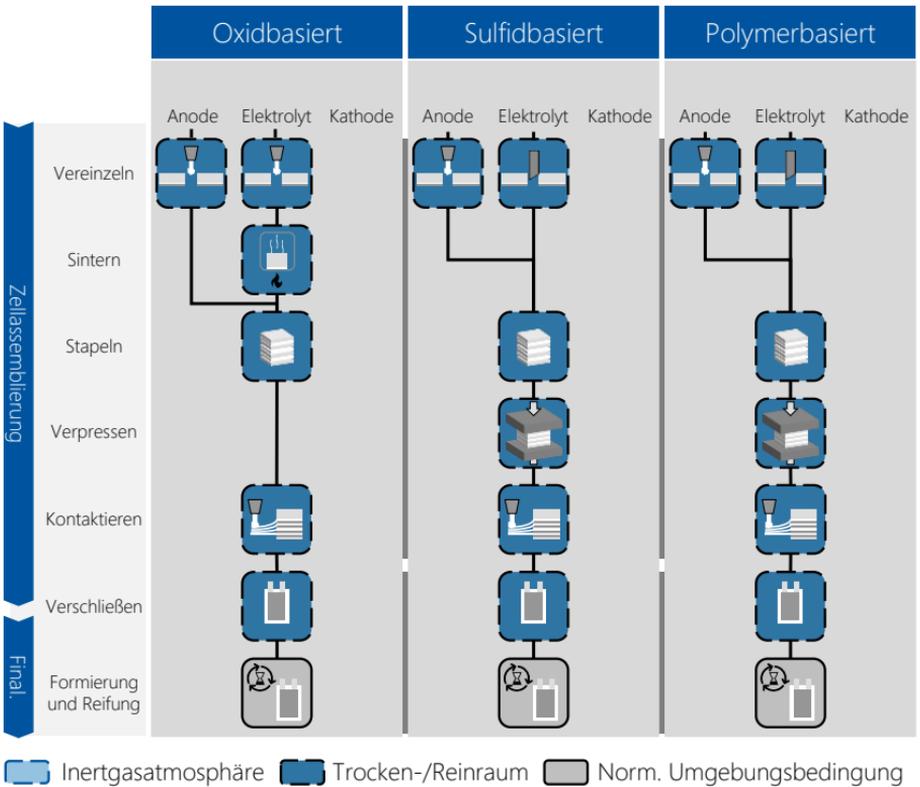
¹ Von links: Kugelmühle, Planetenmischer und Extruder

² Von links: Foliengießen, Co-Extrusion

³ Von links: Aerosol Deposition und Foliengießen

Produktionsprozess

Elektrolytspezifische Prozessübersicht



Elektrodenfertigung

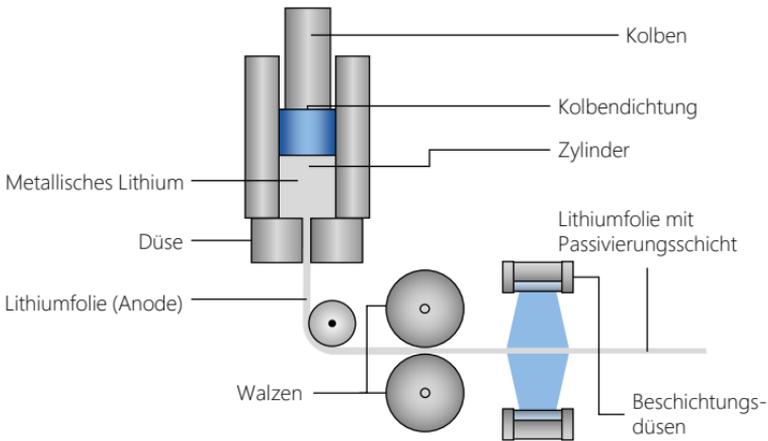
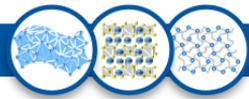
- Das **Endprodukt** in der Anodenfertigung ist für diese Prozessketten eine **Lithiumfolie**, die später im Zellverbund die **negative Elektrode** bildet und für alle drei Technologieketten in dieser Verarbeitungsform benötigt wird.
- Das **Endprodukt** der Kathodenfertigung ist die **positive Elektrode** der Elementarzelle. Die Herstellung unterscheidet sich in Abhängigkeit vom später verwendeten Elektrolytmaterial und Zellaufbau. In den abgebildeten Prozessketten wird die **Kathode direkt als Substrat für die Elektrolytschichtherstellung** verwendet. Dieser Verbund aus Kathode und Festkörperelektrolyt wird anschließend mit der Anode zusammengeführt.

Zellassemblierung und Zellfinalisierung

- Die **Zellassemblierung** und **-finalisierung** laufen für die dargestellten **Prozessketten** ähnlich ab. Im ersten Schritt der Zellassemblierung werden die vorliegenden **Halbzellen** und die **Anodenblätter vereinzelt** und **gestapelt**, um den gewünschten Zellaufbau zu erhalten. Abhängig vom Elektrolytmaterial erfolgt nach dem Stapelprozess eine **Verpressung** des Zellstapels.
- Im nächsten Schritt wird der **Zellstapel kontaktiert** und in das aus einer **Metall-Kunststoff-Mischung** bestehende **Zellgehäuse eingebracht**. Mit der Verwendung einer reinen **Lithium-Metall-Anode** befindet sich die **Batterie** bereits zu diesem Zeitpunkt in einem **geladenen Zustand**.

Kolbenextrusion

Anodentfertigung



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Die Formgebung erfolgt über einen Extrusionsprozess, in dem als Lithium-Metall-Barren vorliegendes Lithium durch einen schlitzförmigen Austrittsquerschnitt gepresst und dabei zu einer Folie umgeformt wird.
- Homogenität, Oberflächenrauheit und finale Foliendicke werden nach der Extrusion durch anschließendes Kalandrieren sichergestellt. Dazu wird die Folie durch zwei Walzen unter Druck und Temperierung gewalzt.
- Optional wird nach der Herstellung der Lithiumfolie eine Passivierungsschicht aufgebracht. Die Oberflächenpassivierung ermöglicht die weitere Verarbeitung der Lithiumfolie im Trockenraum – anstelle einer Inertgasumgebung.

Weiterführende Informationen

- Die Walzen müssen mit den adhäsiven Oberflächen von metallischem Lithium kompatibel sein. Dies lässt sich durch Kunststoffwalzen, z. B. aus Polyacetal, erreichen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Extrusionsgeschwindigkeit
- Temperatur des Lithiums (bis zu 100 °C)
- Presskraft des Kolbens (1.000 – 10.000 kN)
- Zufuhrgeschwindigkeit des Schmiermittels
- Walzengeschwindigkeit
- Düsengeometrie

Qualitätsmerkmale

- Foliendicke
- Folibreite
- Homogenität der Lithiumfolie
- Oberflächenrauheit
- Passivierungsschicht

Herausforderungen

- Adhäsionsneigung und Reaktivität von metallischem Lithium

Technologiealternativen

- PVD-Verfahren¹
- Flüssigbeschichtung (aufgeschmolzenes Lithium)

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen²

niedrig

1

2

3

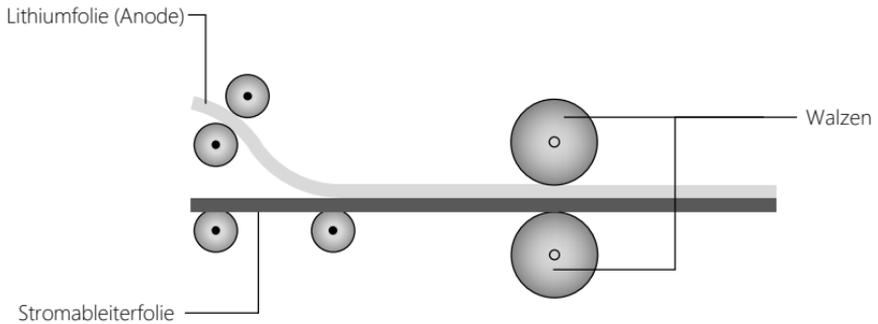
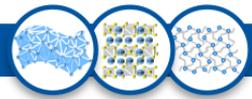
4

5

hoch

¹ Physical Vapor Deposition

² Neuer Prozessschritt im Vergleich zur Lithium-Ionen-Batteriezelle (LIB)



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Nach der Herstellung und der anschließenden Oberflächenpassivierung der Lithiumfolie wird diese auf eine Stromableiterfolie laminiert. Dazu werden die Lithiumfolie und die Stromableiterfolie über Rollen zusammengeführt.
- Im nächsten Schritt werden die beiden Schichten durch zwei Walzen zusammengepresst. Eine Temperierung der Walzen erhöht die Adhäsionskräfte des hergestellten Verbunds.

Weiterführende Informationen

- Die Verbundfolie kann mit unterschiedlichen Schichtdicken der beiden Filme (Lithiumfolie und Stromableiter) direkt bezogen werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Zuführungsgeschwindigkeit der Schichten
- Temperierung/Temperatur
- Walzengeschwindigkeit
- Kalandrierspalt
- Liniendruck ($< 2.500 \text{ N/mm}$)

Qualitätsmerkmale

- Adhäsion zwischen den Schichten
- Ausrichtung der Schichten
- Gleichmäßige Schichtdicke

Herausforderungen

- Adhäsionsneigung von metallischem Lithium beim Laminieren
- Mechanische Schneideverfahren aufgrund des Lithiums ungeeignet

Technologiealternativen

- PVD-Verfahren¹
- Flüssigbeschichtung (aufgeschmolzenes Lithium)

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen²

niedrig

1

2

3

4

5

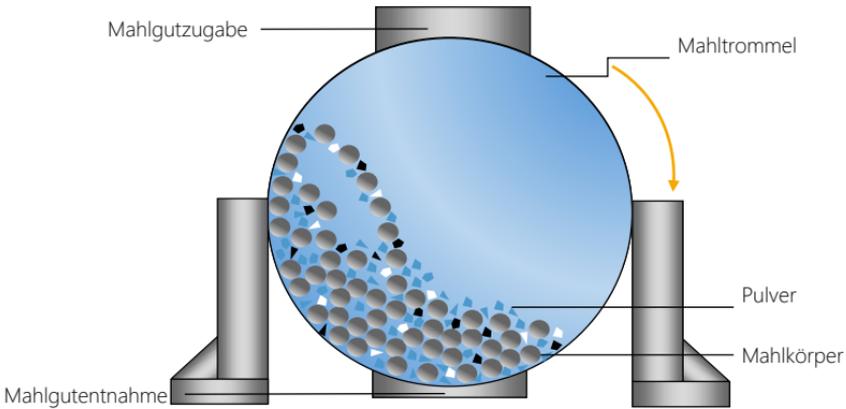
hoch

¹ Physical Vapor Deposition

² Neuer Prozessschritt im Vergleich zur LIB

Mahlen & Mischen

Elektrolytmaterialvorbereitung



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Das Elektrolytpulver kann in einer Kugelmühle hergestellt werden. Dazu werden die Ausgangsmaterialien ohne Zugabe von Flüssigkeit in eine zylindrische Mahltrommel gegeben, in der sich keramische Mahlkugeln befinden. Anschließend wird die Trommel in Rotation versetzt.
- Durch die Rotationsbewegungen des Zylinders werden die Ausgangsmaterialien vermischt. Die Rotationsbewegung sorgt für eine Relativbewegung zwischen den Mahlkörpern und dem Ausgangsmaterial, wodurch Letztgenanntes gemahlen wird, bis das Elektrolytpulver auf eine definierte Partikelgröße reduziert ist.

Weiterführende Informationen

- Anschließend wird das Pulver kalziniert, um die gewünschten Pulvereigenschaften (Minimierung späterer Schrumpfungen des oxidischen Elektrolytpulvers) zu erhalten.
- Das Kathodenmaterial (mit Festkörperelektrolytanteilen) kann analog in einer Kugelmühle hergestellt werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Mahldauer (1 – 10 h)
- Drehzahl (ca. 500 min⁻¹)
- Atmosphäre (Aufstellort): Reinraum oder keine Anforderung
- Menge der Ausgangsmaterialien
- Kugelmateriale (z. B. Keramik)
- Durchmesser der Kugelmühle (1 – 10 mm)

Qualitätsmerkmale

- Mittlere Pulverteilhengröße
- Homogenität des Pulvers (Durchmischungs-grad)

Herausforderungen

- Abrieb der Mahlkörper

Technologiealternativen

- Vibrationsmühle
- Planetenmühle
- Attritormühle
- Rührwerksmühle

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen¹

niedrig

1

2

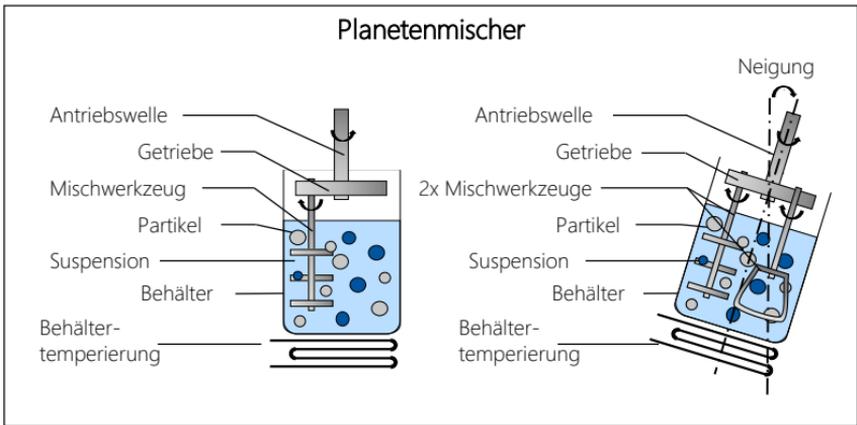
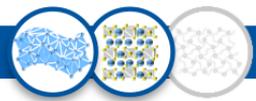
3

4

5

hoch

¹ Ähnlicher Prozessschritt mit angepasster Produktionstechnik



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Sowohl beim Planetenmischer als auch beim Intensivmischer werden die Materialien in Pulverform mit einem Rührwerk in einem Behälter vermischt.
- Die Pulvermischung des Kathodenaktivmaterials wird durch die Beigabe eines Lösungsmittels (z. B. NMP) und von Bindemitteln (z. B. PVDF) zu einem Slurry dispergiert.
- Die meisten sulfidischen Materialien sind empfindlich gegenüber polaren Lösungsmitteln und Feuchtigkeit, was die Auswahl an kompatiblen/verwendbaren Lösungsmitteln einschränkt.

Weiterführende Informationen

- Häufig wird vom „Intensivmischen“ im Kontext von Planetenmischem gesprochen. Charakteristisch sind zusätzliche Features in Form von Mischwerkzeugen (schnell/langsam drehend), einer Vakuumierung oder Temperierung des Mischbehälters. Zusätzlich besteht die Option, den Behälter um bis zu 30° zu neigen.
- Beim Mischen von hochviskosen Slurries ist eine tottraumfreie Geometrie wichtig, damit die Werkzeuge schneller Agglomerate erfassen und die Prozesszeit reduzieren.

Prozessparameter & -anforderungen

- Mischdauer (0,1 - 1 h)
- Drehzahl Rührwerk (100 – 10.000 min⁻¹)
- Temperierung (30 – 50 °C)
- Atmosphäre (im Mischer/Aufstellort): Schutzgas oder Vakuum/Trockenraum etc.
- Füllstand Behälter
- Neigung Mischbehälter (10 – 30°)

Qualitätsmerkmale

- Homogenität des Slurries
- Agglomeratgröße
- Blasenfreiheit
- Reinheit (Fremdkörpergehalt)
- Viskosität

Herausforderungen

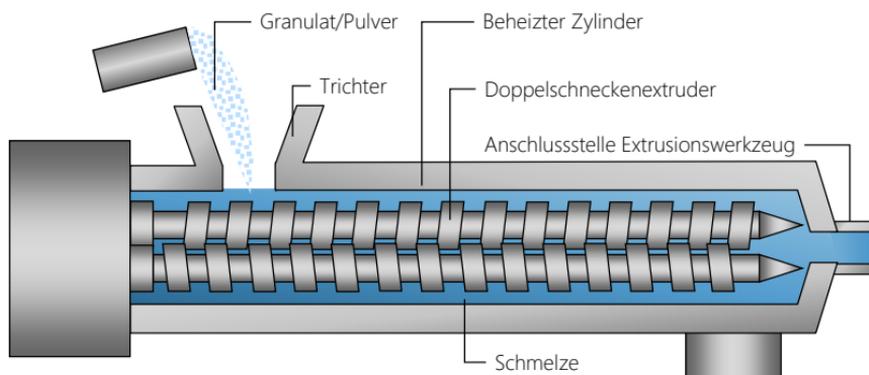
- Vermeidung von Agglomeraten, Inhomogenitäten, Abrieb, Sedimentation sowie Konzentrationsgradienten und Separation

Technologiealternativen

- Acoustic Mixing
- Ultraschallmischen
- Zentrifugalmischen

Compoundieren

Elektrolytmaterialvorbereitung



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Die Herstellung der Kathoden- und der Elektrolytschmelze erfolgt in zwei getrennten „Compoundierung“-Prozessen.
- Die Materialbestandteile werden dem beheizten Zylinder eines Doppelschneckenextruders zugeführt und können dabei in Form von Granulat oder Pulver vorliegen.
- Durch rotatorische Bewegungen des Extruders wird Energie in die Materialbestandteile eingebracht. So entsteht eine homogene Schmelze.

Weiterführende Informationen

- In die Kathodenschmelze werden neben Kathodenaktivmaterial auch Elektrolytpartikel, Binder und Additive hinzugefügt. Die eingebrachten Elektrolytpartikel reduzieren den Grenzflächenwiderstand zwischen Kathoden- und Elektrolytschicht.
- Die Hauptbestandteile der Elektrolytschmelze sind Elektrolytpartikel und Polymerbinder.

Prozessparameter & -anforderungen

- Mischdauer (< 1 h)
- Drehzahl und Drehmoment des Extruders
- Zylindertemperatur (20 – 100 °C)
- Atmosphäre (im Mischer/Aufstellort): Schutzgas oder Vakuum/Trockenraum etc.
- Dosierung
- Scherenergie

Qualitätsmerkmale

- Homogenität des Slurrys
- Agglomeratgröße
- Blasenfreiheit
- Reinheit (Fremdkörpergehalt)
- Viskosität

Herausforderungen

- Vermeidung von Einschlüssen, Agglomeraten, Konzentrationsgradienten und Poren

Technologiealternativen

- Rotor-Stator-Mischer

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen¹

niedrig

1

2

3

4

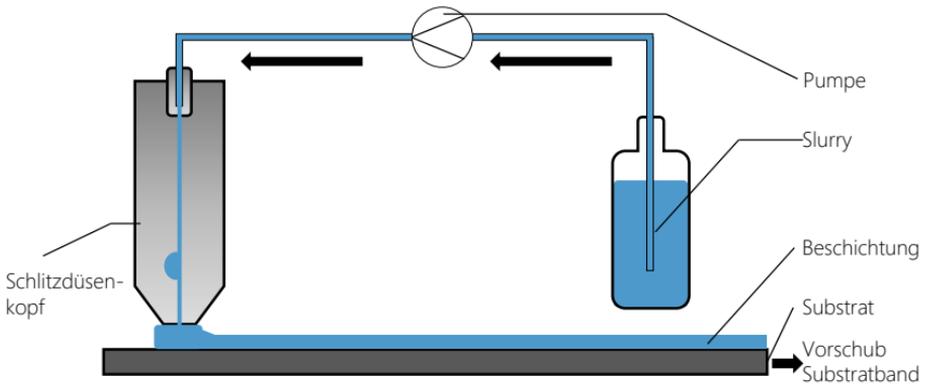
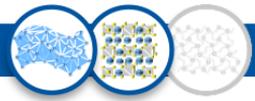
5

hoch

¹ Ähnlicher Prozessschritt mit angepasster Produktionstechnik

Foliengießen

Kathoden- und Elektrolytfertigung



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Bei der Schlitzdüsenbeschichtung wird der Slurry mit Hilfe einer Pumpe durch einen Zuführschlauch gefördert und mittels einer Schlitzdüse auf das Substrat aufgetragen.
- Bei der Schlitzdüsenbeschichtung kann der Slurry einseitig oder beidseitig und kontinuierlich oder intermittierend aufgetragen werden.
- Nachgelagert erfolgt ein Trocknungsschritt, in dem das Lösungsmittel verdunstet. Idealerweise ist eine Möglichkeit der Lösungsmittelrückgewinnung vorgesehen.

Weiterführende Informationen

- Fehlerfreie Beschichtungen erfordern verlässliche Auftragswerkzeuge und stellen Anforderungen an die eingesetzten Lösemittel, z. B. Blasenfreiheit.
- Darüber hinaus muss die Zuführung des Fluids gleichmäßig und pulsationsfrei erfolgen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Bandgeschwindigkeit ($25 - 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)
- Spalthöhe Schlitzdüsenkopf/Substrat
- Temperaturprofil in den Trocknerzonen: $50 - 160 \text{ }^\circ\text{C}$
- Lösemittelrückgewinnung
- Folienvorspannung

Qualitätsmerkmale

- Schichtdickengenauigkeit (Homogenität in und quer zu der Beschichtungsrichtung)
- Oberflächenqualität (Lunker, Partikel)
- Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat

Herausforderungen

- Vermeidung von Schichtdickenvariationen durch Veränderungen der Produktionsbedingungen

Technologiealternativen

- Extrusion
- Walzenbeschichtung
- Siebdruck

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen¹

niedrig

1

2

3

4

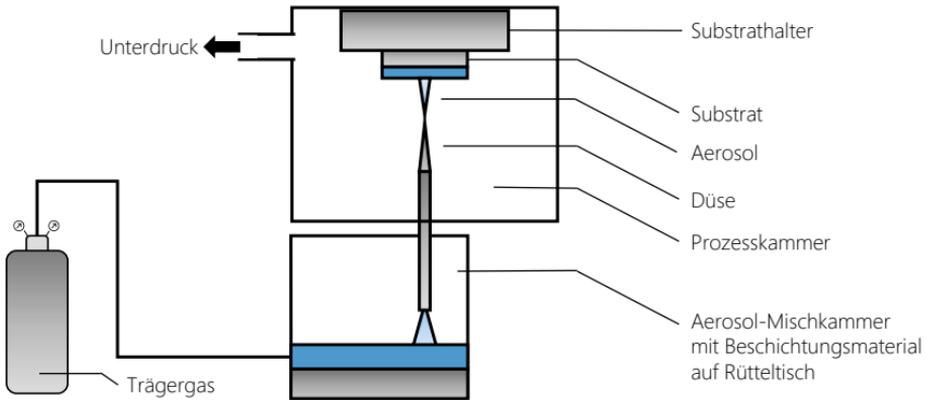
5

hoch

¹ Identischer Prozessschritt im Vergleich zur LIB

Aerosol Deposition

Elektrolytfertigung



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Die Aerosol Deposition ist ein schichtgenerierendes Verfahren und zählt zu den thermischen Spritzverfahren.
- Bei der Aerosol Deposition wird das Festkörperelektrolytpulver zunächst auf einem Rütteltisch mit einem Trägergasstrom (z. B. Luft, N₂, O₂, Ar oder He) zu einem Aerosol vermischt.
- Anschließend wird das Aerosol mit hoher Geschwindigkeit auf das Substrat (hier: Kathode oder Katholyt) beschleunigt.
- Beim Aufprall werden die Beschichtungspartikel zu einer dichten, fest haftenden Schicht verformt.

Weiterführende Informationen

- Die Aerosol Deposition erfolgt in einer Prozesskammer, die optional temperiert oder in welcher Unterdruck erzeugt werden kann. Zusätzlich können weitere Schutzgase eingesetzt werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Beschichtungsrate ($< 10.000 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)
- Massenstrom Pulver ($< 100 \text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)
- Strahlggeschwindigkeit ($100 - 1000 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Abstand Düse/Substrat
- Mischkammertemperatur ($< 200 \text{°C}$)
- Druck Aerosolkammer ($0,0001 - 1 \text{bar}$)

Qualitätsmerkmale

- Konstante Schichtdicke
- Geringe Oberflächenrauheit
- Homogenität und Reinheit der Beschichtung
- Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat

Herausforderungen

- Geringe Depositionsrate
- Vermeidung zu hoher Oberflächenrauheit
- Materialsensitivität (Schädigung der Partikel, instabile Schichtstrukturen)

Technologiealternativen

- Plasmaspritzen
- PVD-Verfahren¹
- CVD-Verfahren²

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen³

niedrig

1

2

3

4

5

hoch

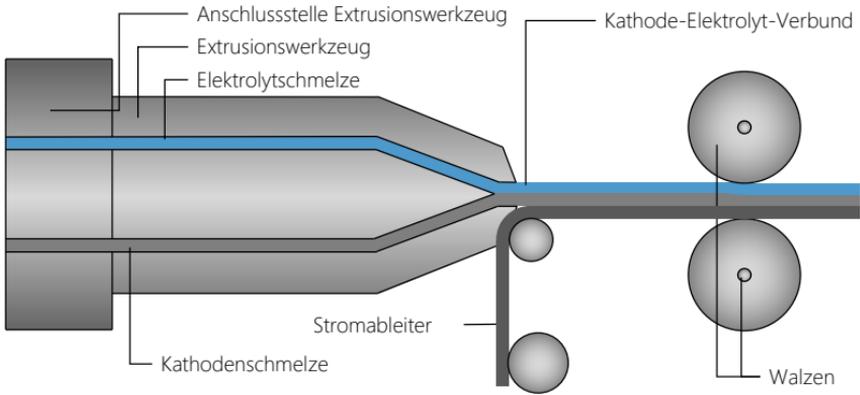
¹ Physical Vapor Deposition

² Chemical Vapor Deposition

³ Neuer Prozessschritt im Vergleich zur LIB

Co-Extrusion

Kathoden- und Elektrolytfertigung



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Die Kathoden- und Elektrolytschmelzen werden in einem geeigneten Werkzeug co-extrudiert. Über jeweils einen separaten Kanal werden Kathoden- und Elektrolytschmelzen unter hohem Druck durch das Extrusionswerkzeug geführt. Dabei erzeugt das Extrusionswerkzeug den Querschnitt des Extrudats, hier den Verbund aus Kathoden- und Elektrolytschicht.
- Im nächsten Schritt werden die Schichten beim Laminieren durch zwei Walzen zusammengepresst. Dabei werden diese erwärmt, um höhere Adhäsionskräfte zu erzielen. Während der Erwärmung und der Pressung dringen Polymere von der einen Schicht in die andere und bilden so die Verbindung von Kathode und Elektrolyt.

Weiterführende Informationen

- Die Schmelzen gelangen über die Kanäle zum Austritt des Extrusionswerkzeugs. Hier werden die Schmelzen zur Herstellung dünner Schichten über eine Schlitzdüse je nach vorgesehener Zellstapelung auf einen Stromableiter oder auf ein Trägerband extrudiert.

Prozessparameter & -anforderungen

- Bandgeschwindigkeit
- Zufuhrate der Schmelzen
- Temperierung/Temperatur
- Extrusionsdruck
- Walzengeschwindigkeit
- Linienlast

Qualitätsmerkmale

- Adhäsion zwischen den Schichten
- Ausrichtung der Schichten
- Gleichmäßige Schichtdicke und -breite
- Gewünschte Verbunddicke

Herausforderungen

- Unterschiedliche Prozesstemperaturen der Materialien

Technologiealternativen

- Foliengiessen
- Siebdruck
- Walzenbeschichtung

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen¹

niedrig

1

2

3

4

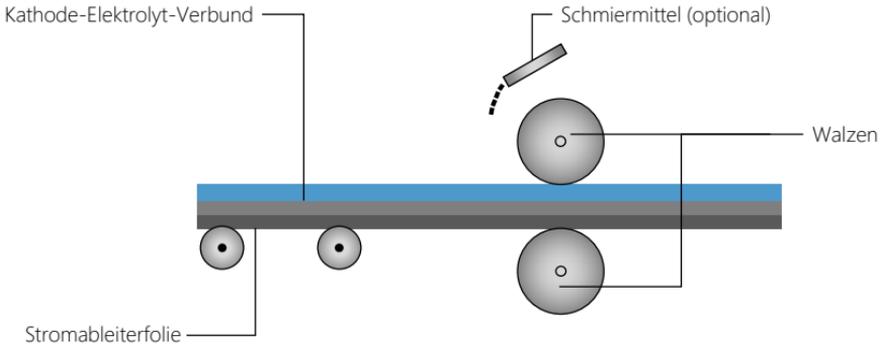
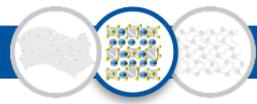
5

hoch

¹ Neuer Prozessschritt im Vergleich zur LIB

Kalandrieren

Kathoden- und Elektrolytfertigung



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Beim Kalandrieren wird der Kathode-Elektrolyt-Verbund durch Aufbringen eines Drucks und Temperatur verdichtet. Der Druck wird dabei durch Kalandrierwalzen aufgebracht, wobei die Elektrodenfolie nicht beschädigt werden darf.
- Die Schichtdicke der Elektrodenfolie lässt sich durch die Breite des Spalts zwischen den Walzen einstellen.
- Bei duktilen sulfidischen und polymeren Festkörperelektrolyten ist der Kalandrierprozess notwendig, um durch Druckaufbringung und Temperierung verbesserte Leistungseigenschaften des Verbundes zu erreichen.

Weiterführende Informationen

- Die oxidbasierten Elektrolyte werden gesintert, weshalb der Kalandriervorgang entfällt.

Prozessparameter & -anforderungen

- Zuführungsgeschwindigkeit des Verbundes
- Temperierung/Temperatur
- Walzengeschwindigkeit
- Kalanderspalt
- Liniendruck ($< 2.500 \text{ N/mm}$)
- Zufuhrgeschwindigkeit des Schmiermittels

Qualitätsmerkmale

- Adhäsion zwischen den Schichten
- Ausrichtung der Schichten
- Gleichmäßige Schichtdicke und -breite
- Gewünschte Verbunddicke

Herausforderungen

- Die hohen Druckspannungen beim Kalandrieren von spröden anorganischen Elektrolytschichten mit einer relativen Dichte von bis zu 100 %

Technologiealternativen

- keine

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen¹

niedrig

1

2

3

4

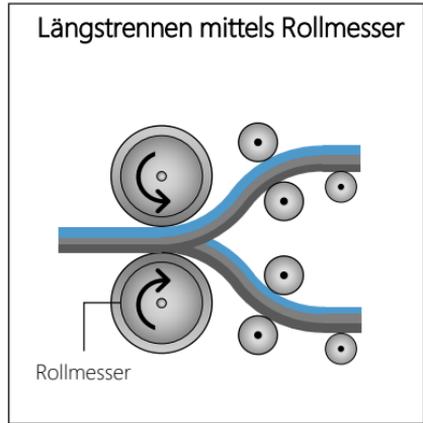
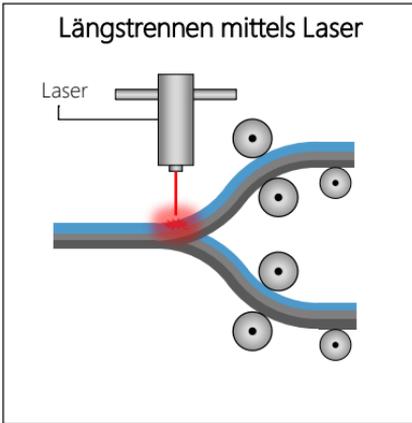
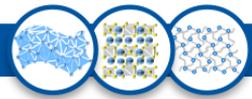
5

hoch

¹ Identischer Prozessschritt im Vergleich zur LIB

Längstrennen

Kathoden- und Elektrolytfertigung



Zellassemblierung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Im letzten Fertigungsschritt der Elektroden- und Elektrolytfertigung werden die Elektrodenfolien durch die Längstrennung in mehrere Elektrodenbänder mit der vorgesehenen Breite geteilt.
- Die Längstrennung erfolgt mechanisch unter Zuhilfenahme von Rollmessern oder mittels Laserschneiden.

Weiterführende Informationen

- Die durch den Einsatz des Rollmessers entstehenden Kräfte können zu einer Durchbiegung des Substrats, zu Rissen und zu einer Delamination der Beschichtung führen. Beim Laserschneiden werden derartige Schnittfehler vermieden, da die Trennung des Materials berührungslos erfolgt.
- Das berührungslose Laserschneiden ist wartungsärmer als das Schneiden mit einem Rollmesser.
- Eine Gefahr beim Laserschneiden stellt die Schichtdelamination dar. Dies wird durch die unterschiedlichen Schmelztemperaturen der Materialien des Schichtverbundes begünstigt.

Prozessparameter & -anforderungen

- Schnittgeschwindigkeit
- Spotgröße
- Impulsenergie und -dauer
- Impulswiederholungsrate
- Laserleistung bzw. Streckenenergie
- Wellenlänge

Qualitätsmerkmale

- Saubere Schnittkante
- Schmale Verdampfungskerbe
- Geringe Wärmeeinflusszone

Herausforderungen

- Vermeidung von Anschmelzungen, Rissen, Durchbiegungen, der Entstehung von Zersetzungsprodukten und der Delamination der Beschichtung

Technologiealternativen

- Stanzen

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen¹

niedrig

1

2

3

4

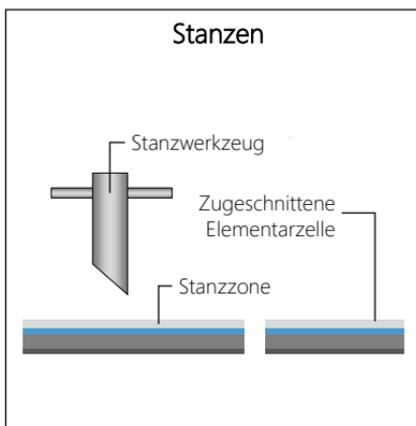
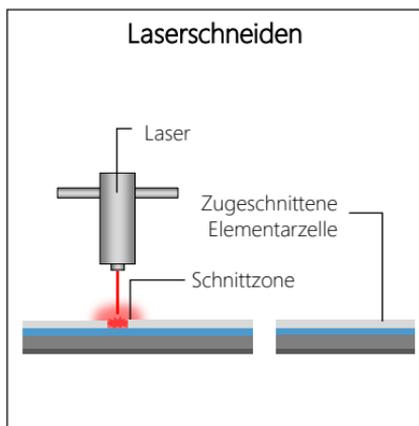
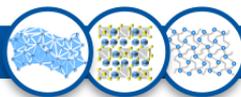
5

hoch

¹ Ähnlicher Prozessschritt mit angepasster Produktionstechnik

Vereinzeln

Zellassemblierung



Elektroden- & Elektrolytfertigung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Nachdem die Schichtlaminiierung abgeschlossen ist, müssen die Elementarzellen (kleinste Zelle, bestehend aus Anode, Elektrolyt und Kathode) zugeschnitten werden, damit diese im nächsten Prozessschritt gestapelt werden können. Dies kann durch einen Laserschnitt oder durch Stanzen erfolgen.
- Durch den Energieeintrag des Lasers in den Schichtverbund ist darauf zu achten, dass die jeweiligen Schichtmaterialien nicht aufgeschmolzen werden, was zu einer elektrischen Verbindung der Schichten und damit zum Kurzschluss führen würde.
- Beim Stanzen liegt die Folie auf einer Schneidmatrize. Der Trennvorgang erfolgt durch das Pressen eines Schneidstempels auf die Folie und in die Schneidmatrize.

Weiterführende Informationen

- keine

Prozessparameter & -anforderungen

- Schnittgeschwindigkeit/ Stanzgeschwindigkeit
- Spotgröße
- Impulsenergie und -dauer
- Impulswiederholungsrate
- Laserleistung bzw. Streckenenergie
- Wellenlänge

Qualitätsmerkmale

- Saubere Schnittkante
- Schmale Verdampfungskerbe
- Geringe Wärmeinflusszone
- Abmaße des Einzelblatts

Herausforderungen

- Vermeidung von Durchbiegungen, Rissen und einer Delamination der Folie
- Unterschiedliche Lasereinstellungen aufgrund der verschiedenen Materialien

Technologiealternativen

- keine

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen¹

niedrig

1

2

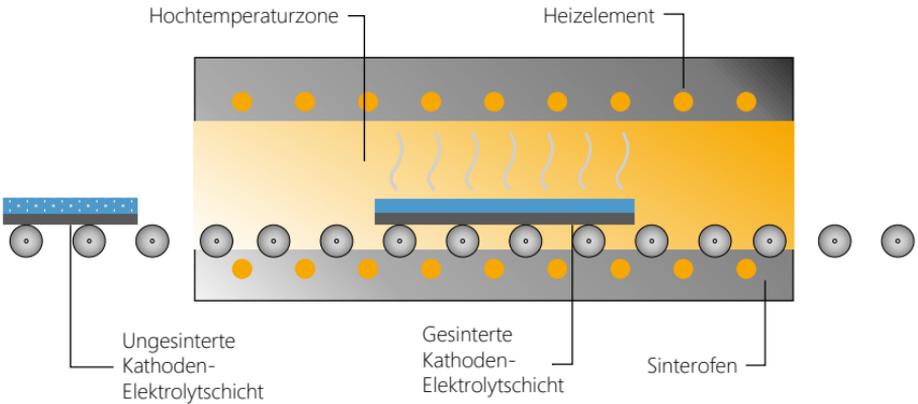
3

4

5

hoch

¹ Ähnlicher Prozessschritt mit angepasster Produktionstechnik



Elektroden- & Elektrolytfertigung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Als Sintern bezeichnet man ein Verfahren, das die Endfestigkeit und Dichte eines Bauteils durch Wärmebehandlung unterhalb der Schmelztemperatur erzeugt. Dabei werden Stofftransportvorgänge thermisch aktiviert, so dass die Partikel des Bauteils zusammenwachsen.
- Das Sintern verdichtet die Kathoden- und Elektrolytschicht (Porosität). Damit lässt sich der Widerstand an der Grenzfläche zwischen dem Elektrolyten und der Elektrode verringern.
- Der Kathode-Elektrolyt-Verbund durchläuft dazu einen Sinterofen. Das Material wird dabei auf eine Temperatur unterhalb des Schmelzpunkts erwärmt.

Weiterführende Informationen

- Der Sinterprozess findet in einer Schutzgasatmosphäre oder im Vakuum statt, um Reaktionen mit der Umgebung zu unterbinden. Das Sintern ist vor allem bei oxidbasierten Festkörperelektrolyten notwendig, um einen ausreichend geringen Grenzflächenwiderstand zu erzielen.
- Zuvor verwendete Binder oder auch Porenbilder werden während des Sinterprozesses verdampft.

Prozessparameter & -anforderungen

- Sinterzeit (i. d. R. mehrere Stunden)
- Sintertemperatur (1.000 – 2.000 °C beim Hochtemperaturesintern, 500 – 800 °C beim Niedrigtemperaturesintern)
- Sinterdruck (Sintern bei Atmosphärendruck bevorzugt)

Qualitätsmerkmale

- Verbundhaftung
- Porosität
- Korngröße
- Vermeidung von Lösungsmittelrückständen

Herausforderungen

- Unterschiedliche Sinterkinetik und physikalische Eigenschaften der Materialien
- Hoher Energieeinsatz für hohe Sintertemperaturen

Technologiealternativen

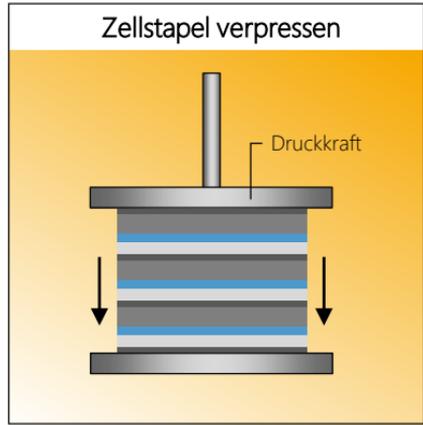
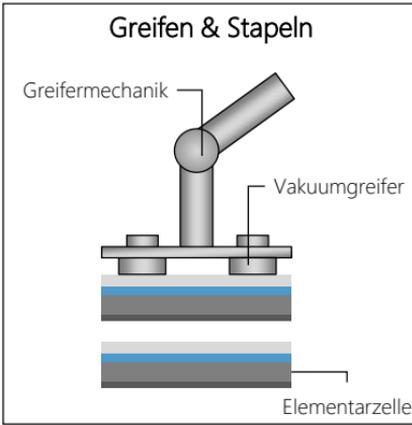
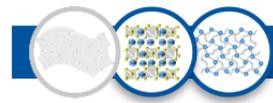
- Spark Plasma Sintering¹
- Pulsed Laser Sintering

¹ Auch bekannt als „Field Assisted Sintering“

² Neuer Prozessschritt im Vergleich zur LIB

Stapeln & Verpressen

Zellassemblierung



Elektroden- & Elektrolytfertigung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Die Elementarzellen werden mit Greifern übereinander positioniert. Bei der Auswahl der Greifertechnik ist auf die Beschädigungsfreiheit der Oberfläche zu achten.
- Beim Einsatz von sulfidischen oder polymeren Festelektrolyten werden die Elementarzellen durch Aufbringen von Druck und Wärme zusammenlaminiert. Beim sulfidischem Elektrolyt werden dadurch die Korngrenzenwiderstände im Elektrolyt verringert, die Lithium-Ionen-Leitfähigkeit gesteigert und der Grenzflächenwiderstand zwischen dem Elektrolyt und den Elektroden verringert.

Weiterführende Informationen

- Die Elementarzellen können direkt bipolar gestapelt werden. Die so entstehende Serienverschaltung der Zellen ermöglicht eine vervielfachte Zellspannung und Reduktion der Verpackungswände (Anzahl Ableiter etc.), da nur die äußeren Ableiter benötigt werden (siehe auch „Kontaktieren & Verschließen“).
- Darüber hinaus muss kein Separator zusätzlich mitgestapelt werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Stapelgeschwindigkeit (< 1 s/Blatt)
- Stapelgenauigkeit (< 300 µm)
- Temperatur
- Druckkraft

Qualitätsmerkmale

- Positioniergenauigkeit
- Beschädigungsfreie Oberflächen

Herausforderungen

- Positionserkennung und -ausrichtung der Sheets mit einem Vakuumbreifer
- Vermeidung von Kurzschlüssen bei der Stapelung

Technologiealternativen

- Kontinuierliche Stapelprozesse
- Wickeln der Elementarzellen¹

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen²

niedrig

1

2

3

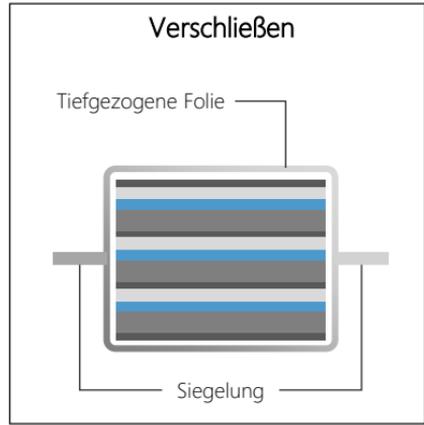
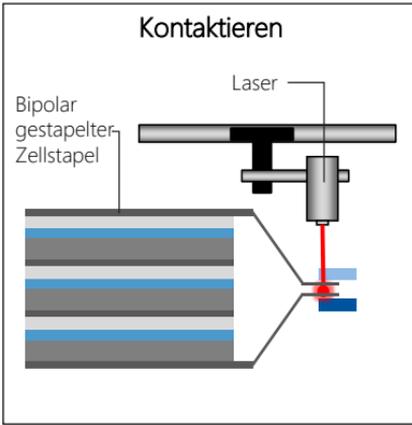
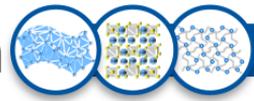
4

5

hoch

¹ Wicklungen bzw. „Jelly rolls“ sind aufgrund der festen Bestandteile der All-Solid-State-Batterie kaum möglich und mit Herausforderungen verbunden.

² Ähnlicher Prozessschritt mit angepasster Produktionstechnik



Elektroden- & Elektrolytfertigung

Zellfinalisierung

Prozessbeschreibung

- Die Kontaktierung kann mittels Laserstrahlschweißen erfolgen. Nach der Kontaktierung wird die All-Solid-State-Batteriezelle in eine elektrisch isolierte, tiefgezogene Pouchtasche eingebracht und versiegelt, damit diese vor Umwelteinflüssen geschützt wird.
- Als Verpackungsmaterialien eignen sich Folien im Metall-Kunststoff-Verbund.
- Die äußeren Stromableiter müssen elektrisch isoliert in die Folie eingebracht werden. Die Verpackung wird über Impuls- oder Kontaktsiegeln vollständig verschlossen.

Weiterführende Informationen

- Bei der bipolar gestapelten Zelle müssen nur die beiden äußeren Stromableiter nach Einbringung in das Gehäuse nach außen geführt, mit den Kontaktfahnen kontaktiert und über die Siegelnaht fixiert werden.
- Die Elektrolytbefüllung, die bei der Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien auf den Prozess des Verschließens folgt, entfällt bei der Fertigung von All-Solid-State-Batterien.

Prozessparameter & -anforderungen

- Schweißgeschwindigkeit
- Pulsfrequenz
- Laserleistung (< 4.000 W)
- Spotgröße
- Siegelzeit, -temperatur und -druck
- Tiefziehtiefe der Pouchfolie (< 10 mm)

Qualitätsmerkmale

- Geringe mechanische und thermische Belastung bei den Schweißvorgängen
- Geringer Übergangswiderstand der Schweißstellen zur elektrischen Kontaktierung
- Festigkeit und Dichtigkeit der Siegelnaht

Herausforderungen

- Mögliche Schädigungen beim Schweißen
- Volumenveränderungen beim Laden und Entladen

Technologiealternativen

- Ultraschallschweißen

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen¹

niedrig

1

2

3

4

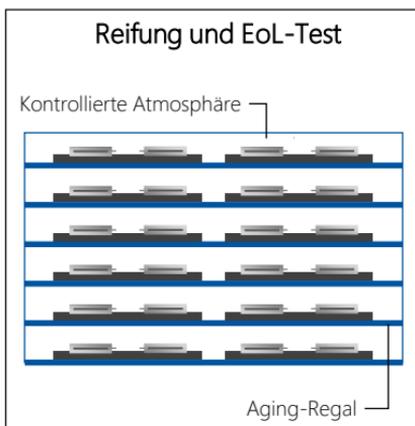
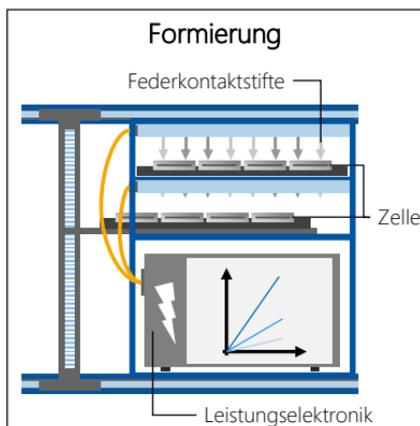
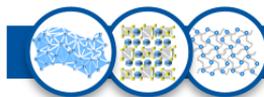
5

hoch

¹ Identischer Prozessschritt im Vergleich zur LIB

Formierung & Reifung

Zellfinalisierung



Elektroden- & Elektrolytfertigung

Zellassemblierung

Prozessbeschreibung

- Bei der Formierung wird die Batteriezelle den ersten Lade- und Entladezyklen ausgesetzt. Im assemblierten Zustand ist eine All-Solid-State-Batterie mit Lithium-Metall-Anode bereits geladen.
- In der Zelle bildet sich eine Grenzschicht zwischen Elektrolyt und Elektroden aus. Diese Schicht beeinflusst maßgeblich die Ionenleitfähigkeit und damit die Performance der Zelle.
- Die Reifung – auch „Aging“ genannt – stellt den finalen Schritt der Zellfertigung dar und dient der Qualitätssicherung. Dabei lagern die Zellen in Aging-Regalen und/oder -Türmen.
- Während des Reifens werden unter kontrollierten Atmosphärenbedingungen Veränderungen der Zell-Performance durch regelmäßige Messung der Leerlaufspannung der Zelle überprüft.

Weiterführende Informationen

- Im Vergleich zur Li-Ion-Zelle verursacht die Formierung einen geringeren Zeit-/Kostenaufwand.¹
- Zudem wird eine kürzere Aging-Dauer erwartet, da aufgrund des festen Elektrolyten schneller stabile Eigenschaften der Zelle erreicht werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Definierte C-Rate für den ersten Entlade- und Ladevorgang sowie sukzessive Steigerung
- Strom- und Spannungsverlauf
- Ladezustand der Zelle zu Beginn der Reifung
- Aging-Dauer
- Umgebungsbedingung (Temperatur etc.)

Qualitätsmerkmale

- Ausbildung der Grenzschicht
- Zeitliche Stabilität der Grenzschicht
- Innenwiderstand der Zelle
- Kapazität
- Selbstentladerate

Herausforderungen

- Lage der Zellen
- Kontaktierungsart
- Prozesstemperatur

Technologiealternativen

- Es existieren unterschiedliche Prozeduren für die Abfolge und die Dauer von Hochtemperatur- und Raumtemperatur-Reifung je nach Zellhersteller und Zellchemie.

Übertragbarkeit von Kompetenzen aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen²

niedrig

1

2

3

4

5

hoch

¹ Die Formierung und das Reifen gründen auf großem Erfahrungswissen, das für All-Solid-State-Batterien durch die fehlende Serienreife noch nicht existiert. Jedoch zeichnet sich, basierend auf den Materialeigenschaften und Grenzflächen, eine zeitliche Reduktion ab.

² Identischer Prozessschritt im Vergleich zur LIB