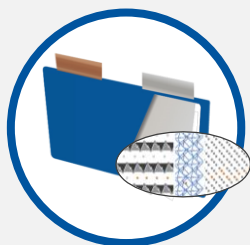
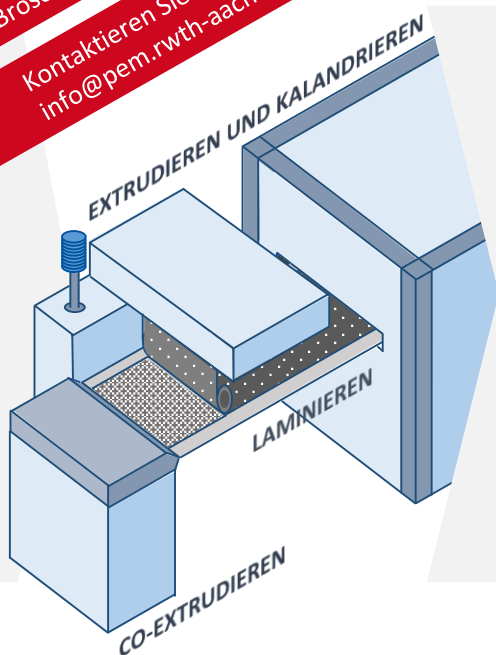


Auch als kostenlose
Broschüre erhältlich

Kontaktieren Sie uns unter:
info@pem.rwth-aachen.de



PRODUKTION EINER ALL-SOLID-STATE- BATTERIEZELLE



RWTHAACHEN
UNIVERSITY



Batterieproduktion



Das PEM der RWTH Aachen ist seit vielen Jahren im Themenfeld der Batterieproduktion der Lithium-Ionen-Batterietechnologie tätig. Das Tätigkeitsfeld erstreckt sich sowohl über Automotive-, als auch über Stationäre-Anwendungen. Durch eine Vielzahl nationaler und internationaler Industrieprojekte in Unternehmen aller Wertschöpfungsstufen sowie zentralen Positionen in namhaften Forschungsprojekten bietet das PEM weitreichende Expertise.



PEM

Chair of Production Engineering of E-Mobility Components
Campus Boulevard 30
52074 Aachen

www.pem.rwth-aachen.de

Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagebau (VDMA) vertritt über 3200 Unternehmen des mittelständisch geprägten Maschinen- und Anlagenbau. Die Fachabteilung Batterieproduktion thematisiert die Produktionstechnik von Batterien. Mitgliedsunternehmen liefern Maschinen, Anlagen, Maschinenkomponenten, Werkzeuge und Dienstleistungen in der gesamten Prozesskette der Batterie-fertigung: Von der Rohstoffaufbereitung, Elektrodenproduktion und Zellaassemblierung bis hin zur Modul- und Packfertigung.



VDMA

Battery Production
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main

www.vdma.org

Autoren

PEM der RWTH Aachen



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



Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker



Ansgar vom Hemdt
Gruppenleiter Battery Components
A.vomhemdt@pem.rwth-aachen.de



Christoph Schön
Battery Production
C.Schoen@pem.rwth-aachen.de

VDMA



Dr. Sarah Michaelis
Battery Production, Division Manager
Sarah.Michaelis@vdma.org



Ehsan Rahimzei
Battery Production, Project Manager
Ehsan.Rahimzei@vdma.org



Haben Sie Fragen?

Sprechen Sie uns an!



Post-Lithium-Ionen-Technologien

Wie sieht die Zukunft der Batterie aus?

Höhere Energiedichten und höhere Sicherheit zu niedrigeren Kosten – so lautet die Idealvorstellung zu zukünftigen Batterie-Technologien, die oft unter dem Begriff „**Post-Lithium-Ionen-Technologien**“ zusammengefasst werden. Bei genauerer Betrachtung sind bei einem Großteil dieser Technologien weiterhin Lithium-Ionen im Einsatz. Viele neue Ansätze sind dabei grundsätzlich vielversprechend, wie **All-Solid-State-, Lithium-Luft- oder Lithium-Schwefel-Batterien**.

Diesen ist jedoch gemein, dass noch eine Vielzahl an Herausforderungen sowohl auf Produkt- als auch Prozessseite bestehen. Keine der Technologien befindet sich derzeit in einem serienreifen Entwicklungsstand, auf dessen Basis die industrielle Produzierbarkeit vollumfänglich bewertet werden könnte.

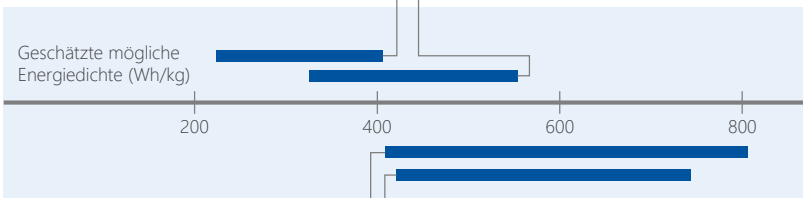
Dabei müssen sich diese neuen Technologien stets mit der **bekannten Lithium-Ionen-Technologie** messen lassen, welche sich in den kommenden Jahren ebenfalls **weiterentwickeln** wird.

Hochenergie-Lithium-Ionen-Batterie

- **Evolutionäre Verbesserung** durch Hochenergie-Materialien
- **Nickelreiche NMC- oder NCA-Kathoden** versprechen höhere gravimetrische und volumetrische Energiedichten, insbesondere in Kombination mit Silizium-Komposit-Anoden
- Weitere **Kostenreduktionen** sind zu erwarten
- Nur **leichte Anpassungen** im **Produktionsprozess** notwendig

Lithium-Schwefel-Batterie

- An der Kathode verbindet sich bei der Entladung Lithium mit Schwefel zu **Lithiumsulfiden**
- Schwefel als häufiges und **kostengünstiges Material** verspricht preislich attraktive Batteriezellen
- **Unklare zyklische und kalendarische Lebensdauer** sowie große Temperaturabhängigkeit stehen einer industriellen Marktreife noch im Weg
- **Volumetrische Energiedichte** erscheint derzeit für den Automotive-Einsatz zu gering



Lithium-Luft-Batterie

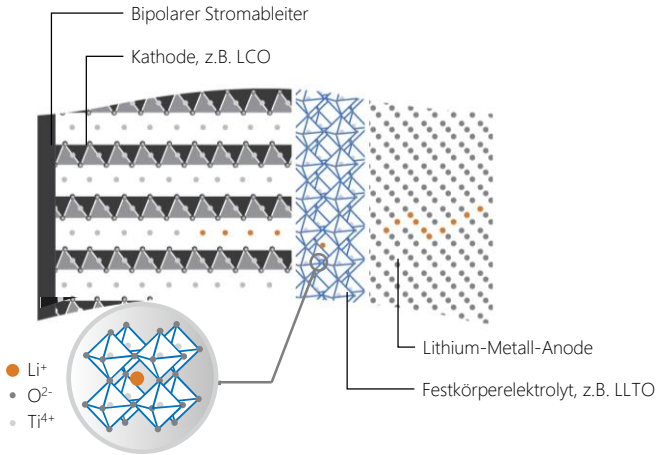
- Bei Entladung wird Lithium an der Kathode mit Sauerstoff zu **Lithiumperoxid und Lithiumoxid** oxidiert
- Theoretisch sehr hohe Energiedichte und **Verwendung von Umgebungsluft**
- Massive Herausforderungen bei der Zyklenstabilität, weshalb ein **Automotive-Einsatz im kommenden Jahrzehnt unrealistisch** erscheint

All-Solid-State-Batterie

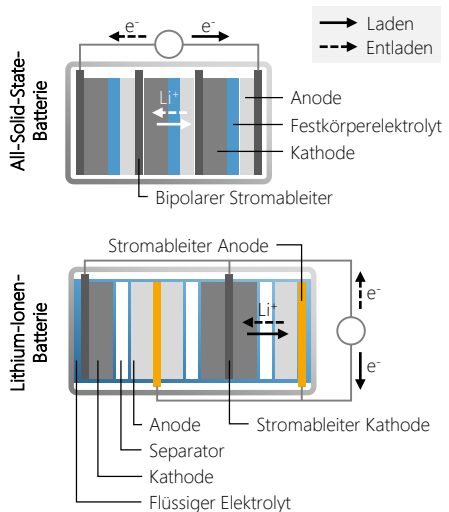
- **Elektrolyt liegt in fester Form** vor, keine Flüssigkeiten werden verwendet
- Sehr **hohe Energiedichte und Sicherheit** auf Laborebene erzielbar, welche für den Automotive-Einsatz essentiell sind
- Herausforderungen bei den **Materialkompatibilitäten und der Herstellbarkeit in Serie** stehen einer Marktreife noch im Weg

Diese Broschüre legt einen 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



- In einer All-Solid-State-Batterie sorgt ein Ionen-durchlässiger **Festkörperelektrolyt** sowohl für die räumliche als auch die elektrische Trennung zwischen Kathode und Anode; gleichzeitig dient er als Separator.
- Verschiedene Zell-Designs sind denkbar. Die **Abbildung oben zeigt eine Dünnschichtzelle**. Dickere Schichten können mit einer **Mischkathode** aufgebaut werden.
- Beim **Entladevorgang** einer All-Solid-State-Batterie bewegen sich Lithium-Ionen von der Anode durch den festen Elektrolyten zur Kathode. Gleichzeitig fließt an der äußeren Last ein Strom.
- Der **Widerstand an der Grenzfläche** zwischen Anode und Elektrolyt ist mitentscheidend für die Performance der Batteriezelle. Dieser kann durch eine **zusätzliche Schicht**, bspw. eines Polymers oder einer Aluminium-Legierung, verringert werden.
- Die Abbildung rechts zeigt den Zellstapel einer All-Solid-State-Batterie im Vergleich mit einer Lithium-Ionen-Batterie.
- Aufgrund des festen Elektrolyten ist eine **bipolare Stapelung** möglich. Dadurch entsteht eine **serielle Verschaltung** der Elementarzellen.

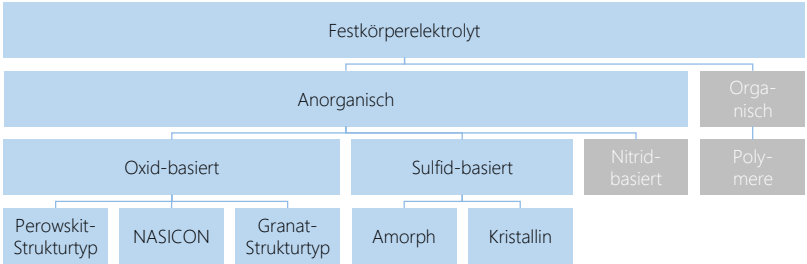


Materialien

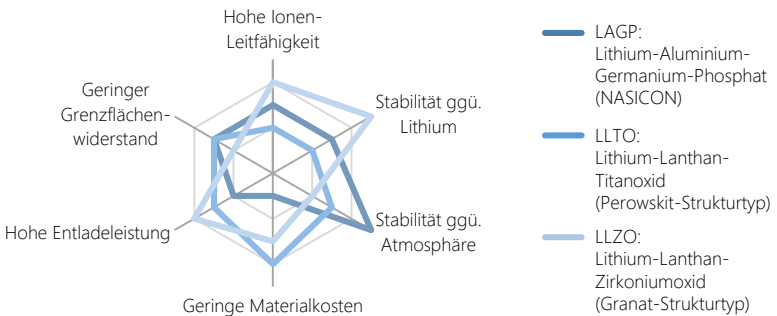
einer All-Solid-State-Batterie

Elektrolyt

Festkörperelektrolyten können in **organische und anorganische Elektrolyten** unterteilt werden. Bei anorganischen Elektrolyten überwiegen die Vorteile zur Sicherheit, da diese nicht entflammbar sind und keine toxischen Materialien beinhalten. Daher liegt in dieser Broschüre der Fokus auf anorganischen Elektrolyten. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Materialkategorien und zeigt eine Auswahl konkreter Strukturtypen.



- **Oxid-basierte Elektrolyten** weisen in der Regel eine gute chemische Stabilität auf und sind mit hochenergetischen Kathodenmaterialien kompatibel. Die Ionen-Leitfähigkeit ist jedoch niedriger als bei sulfid-basierten Elektrolyten.
 - Unter den oxid-basierten Elektrolyten sind Materialien mit **Perowskit-** oder **Granat-Struktur** sowie **NASICON** vielversprechend. Die folgende Abbildung zeigt eine qualitative Einordnung der Eigenschaften. Weitere Vertreter sind LiPON, LISICON, Lithium-Halogenide und Lithium-Hydride.



- **Sulfid-basierte Elektrolyten** besitzen im Allgemeinen eine höhere Ionen-leitfähigkeit, sind jedoch chemisch unbeständig.
 - Das **amorphe** Lithium-Zinn-Phosphorsulfid (LSPS) ist kostengünstig und besitzt bei Raumtemperatur eine sehr hohe Ionen-Leitfähigkeit. Problematisch sind jedoch die Inkompatibilitäten mit Lithium-Metall.
 - Für das **kristalline** Lithium-Germanium-Phosphor-Sulfid (LGPS) ist die Ionen-Leitfähigkeit mit flüssigen Elektrolyten vergleichbar. LGPS ist jedoch hochsensitiv gegenüber Feuchtigkeit und Lithium-Metall, zudem ist Germanium sehr kostenintensiv.

Materialien

einer All-Solid-State-Batterie

Anode

- **Lithium-Metall-Anoden** gelten aufgrund ihrer hohen theoretischen Kapazität, mit der die größte Energiedichte erzielt werden kann, als ideal. Metallisches Lithium neigt jedoch zur Dendritenbildung, was durch den Festkörperelektrolyten unterbunden werden muss. Zudem ist eine Handhabung unter inerter Atmosphäre notwendig, da Lithium eine passivierende Schicht mit dem Umgebungssauerstoff bildet.
- **Silizium als Anodenmaterial** verspricht sehr hohe Energiedichten, erfährt jedoch extreme Volumenänderungen bei der Legierungsbildung mit Lithium.

Kathode

- Die **Kathode** besteht aus einem **Metalloxid**. Hier wird meist auf bekannte Kathodenmaterialien zurückgegriffen, da bisher nahezu keine speziell für die All-Solid-State-Batterie entwickelte Materialien existieren.
- Theoretisch sind je nach Elektrolyt von kostengünstigen und sicheren Materialien wie Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) bis hin zu Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC) eine Vielzahl bekannter Kathodenmaterialien einsetzbar. In der Praxis zeigt bisher lediglich **Lithium-Cobalt-Oxid LCO als Kathode in Kombination mit LLZO als Elektrolyt** ausreichende Stabilität und Performance.

Eigenschaften

einer All-Solid-State-Batterie

Chancen



Hohe Energiedichten von bis zu 500 Wh/kg und 1000Wh/L auf Zellebene sind dank einer metallischen Anode und einer dünnen Elektrolytschicht möglich.



Im Betrieb kann eine **hohe Sicherheit** gewährleistet werden. Das Explosions- und Brandrisiko ist minimiert, da keine brennbaren Flüssigkeiten oder Gase austreten können.



Kurze Ladezeiten können erreicht werden, da der Festkörperelektrolyt die Gefahr der Dendritenbildung stark verringert.



Die Betriebsfähigkeit ist über einen **großen Temperaturbereich** von ca. -30 bis +100°C gegeben.

Herausforderungen



Die **Ionen-Leitfähigkeit von Festkörperelektrolyten** liegt i.A. eine Größenordnung unter der von flüssigen Elektrolyten. Auch der **Widerstand an der Grenzfläche** von Elektrolyt und Elektrode ist zu optimieren.



Die **Materialkompatibilität** zwischen Festkörperelektrolyt und Lithium-Metall-Anode muss durch geeignete Modifikationen gewährleistet werden.

Produktionsprozess einer All-Solid-State-Batterie

- Die Fertigung einer All-Solid-State-Batterie kann in **drei übergreifende Schritte** eingeteilt werden: Elektroden- und Elektrolytfertigung, Zell-Assemblierung und Zell-Finishing.
- Eine allgemeingültige Prozesskette existiert nicht, stattdessen kann eine **Vielzahl von alternativen Prozessketten** zur Anwendung kommen. Diese unterscheiden sich zum Teil von der Herstellung einer Lithium-Ionen-Batterie.
- Im Rahmen dieser Broschüre werden **zwei mögliche Prozessalternativen** vorgestellt, die sich vor allem in der Elektroden- und Elektrolytfertigung unterscheiden.

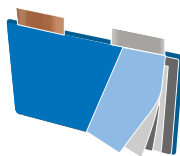


- Beide Prozessalternativen beziehen sich auf die Herstellung von **Pouch-Zellen** mit **anorganischen Festkörperelektrolyten**. Das Pouch-Zell-Format erscheint für All-Solid-State-Batterien am geeignetsten:



Rund- oder prismatische Zelle

Wicklungen sind aufgrund der festen Bestandteile der All-Solid-State-Batterie mit großen Herausforderungen verbunden. In spröden Keramiksichten können Risse auftreten. Zudem ist die Frage nach einer ausreichenden Schichthaftung bisher unbeantwortet.



Pouch-Zelle

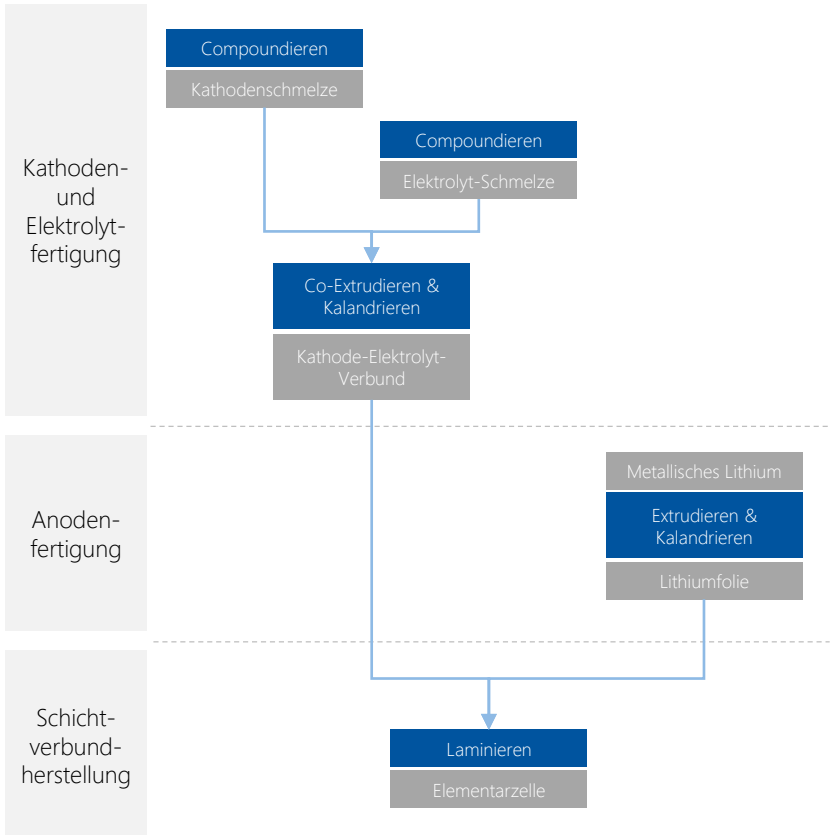
Stapelungen sind für All-Solid-State-Batterien vorteilhaft, da die ebenen Schichten nicht verformt werden. Zudem kann schon in der Elektroden- und Elektrolytfertigung der Schichtverbund hergestellt werden, sodass anschließend lediglich die Elementarzellen gestapelt werden.

- Aufgrund der Reaktivität der Materialien mit der Umgebung ist ein Trockenraum für die Produktion erforderlich. Beim Umgang mit metallischem Lithium ist eine **inerte Atmosphäre**, z.B. Argon, zu präferieren.
- Für jeden Prozessschritt erfolgt eine **qualitative Einschätzung der Übertragbarkeit von Kompetenzen** aus der Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriezellen.

Produktionsprozess

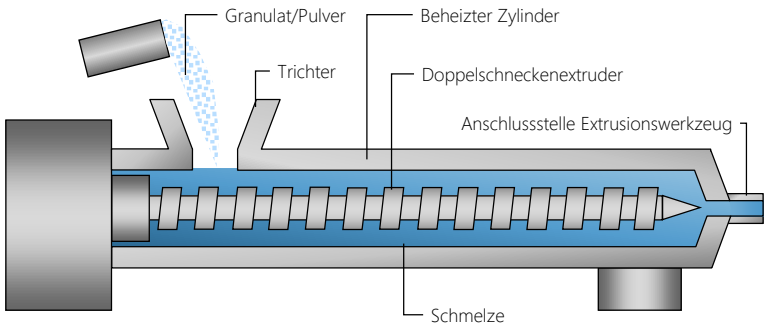
Elektroden- und Elektrolytfertigung: Alternative A

- In der Elektroden- und Elektrolytfertigung wird der Verbund aus Kathode, Elektrolyt und Anode hergestellt.
- Nach der Elektroden- und Elektrolytfertigung liegt eine Elementarzelle vor.
- Hauptmerkmal der zunächst vorgestellten Prozesskette A ist ein kontinuierlicher Extrusionsprozess, bei dem die Schichten anschließend laminiert werden.
- Diese Prozesskette eignet sich vor allem für Sulfid-basierte All-Solid-State-Batterien.



Compoundieren

Kathoden- und Elektrolytfertigung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Die Herstellung der Kathoden- und der Elektrolytschmelze erfolgt in zwei getrennten Compoundierungsprozessen.
- 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.
- Für die Kathode werden neben Kathodenaktivmaterial auch Elektrolytpartikel, welche den Widerstand zwischen Kathode und Elektrolyt verringern, sowie Binder und Additive vermischt.

Zusätzliche Informationen

- Die Materialbestandteile des Elektrolyten sind Elektrolytpartikel und Polymerbinder.

Prozessparameter & -anforderungen

- Zufuhrmenge der einzelnen Materialien
- Zylindertemperatur und -druck
- Drehzahl und Drehmoment des Extruders
- Scherenergie

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Homogenität der Schmelze
- Viskosität der Schmelze
- Anzahl und Größe von Agglomeraten

Herausforderungen [Auszug]

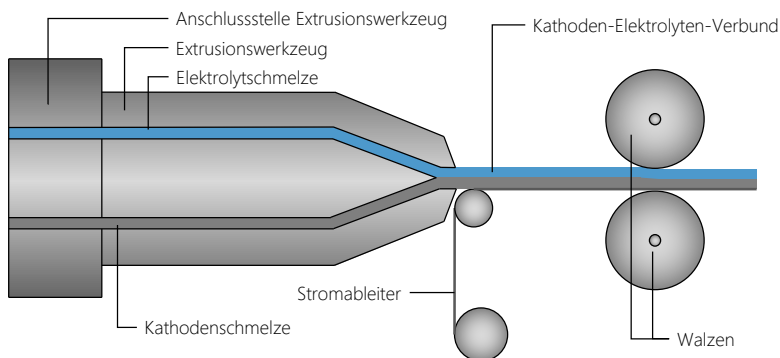
- Homogene Durchmischung der einzelnen Materialien

Technologiealternativen [Auszug]

- Hochleistungsmischanlage

Co-Extrudieren

Kathoden- und Elektrolytfertigung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Die Kathoden- und Elektrolytschmelzen werden in einem geeigneten Werkzeug co-extrudiert. Dadurch entsteht ein Verbund aus Kathoden- und Elektrolytschicht.
- Über jeweils einen separaten Kanal werden Kathoden- und Elektrolytschmelzen durch das Extrusionswerkzeug geführt.
- Die Schmelzen gelangen über die Kanäle zum Austritt des Extrusionswerkzeugs. Hier werden die Schmelzen über eine Schlitzdüse auf einen Stromableiter extrudiert.
- Nach der Extrusion wird der Verbund kalandriert, um die Adhäsion zwischen den einzelnen Schichten zu verbessern und die gewünschten Schichtdicken zu erzielen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Einstellung der Schichtdicke
- Zufuhrate der Schmelzen
- Temperatur
- Druck
- Walzengeschwindigkeit
- Pressdruck der Kalandrier-Walzen

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Schichtdicke
- Schichtenbreite
- Haftung zwischen den Schichten

Herausforderungen [Auszug]

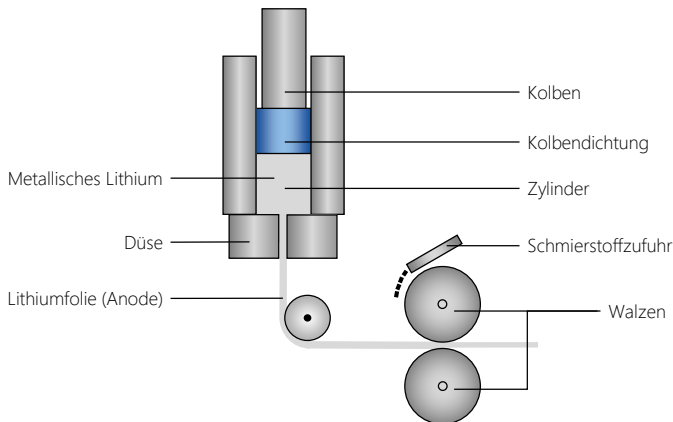
- Unterschiedliche Prozesstemperaturen in Abhängigkeit der Materialien

Technologiealternativen [Auszug]

- Folien gießen (Tape Casting)
- Siebdruck

Extrudieren und Kalandrieren

Anodenfertigung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Als Anode einer All-Solid-State-Batterie kann eine metallische Lithiumfolie verwendet werden. Diese Lithiumfolie kann durch Extrusion mit anschließendem Kalandrieren hergestellt werden.
- Dazu wird das flüssige Lithium in den Zylinder eines Kolbenextruders gefüllt. Durch einen Kolben wird dann das Lithium in eine Düse gepresst.
- Die Homogenität und gewünschte Foliendicke wird nach der Extrusion durch Kalandrieren sichergestellt. Dazu wird die Folie unter Zugabe eines Schmierstoffes durch zwei Walzen unter Druck gewalzt.

Zusätzliche Informationen

- Die Walzen müssen mit den adhäsiven Eigenschaften von Lithium kompatibel sein. Dies kann durch Kunststoffwalzen, z.B. aus Polyacetal erreicht werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Extrusionsgeschwindigkeit
- Temperatur
- Düsengeometrie
- Pressdruck der Kalandrierwalzen
- Zufuhrgeschwindigkeit des Schmiermittels
- Walzengeschwindigkeit

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Foliendicke
- Folienbreite
- Homogenität der Lithiumfolie

Herausforderungen [Auszug]

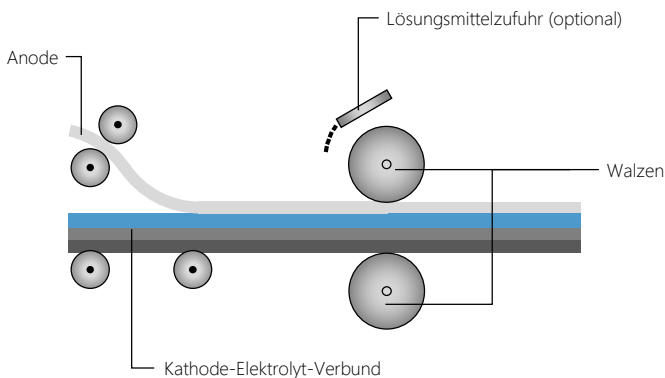
- Adhäsionsneigung von metallischem Lithium beim Kalandrieren

Technologiealternativen [Auszug]

- PVD-Verfahren
- Atomlagenabscheidung (CVD-Verfahren)

Laminieren

Schichtverbundherstellung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Nach der Herstellung der Lithiumfolie wird diese auf den Kathode-Elektrolyt-Verbund laminiert. Hierzu werden die beiden Schichten über Rollen zusammengeführt.
- Im nächsten Schritt werden die beiden Schichten 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 der von Anode und Elektrolyt.

Zusätzliche Informationen

- Unterschieden werden kann zwischen trockener und nasser Laminierung. Bei der nassen Laminierung werden die Kontaktoberflächen vor der Laminierung mit einem Lösungsmittel befeuchtet. Dies ermöglicht eine Laminierung mit geringerer Temperatur und geringerem Druck.

Prozessparameter & -anforderungen

- Zuführungsgeschwindigkeit der Schichten
- Walzengeschwindigkeit
- Pressdruck (Größenordnung $12-40 \text{ N/mm}^2$, einstellbar über den Walzendruck oder den Kalanderspalt)
- Optionale Erwärmung der Schichten

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Haftung zwischen den Schichten
- Gewünschte Verbunddicke
- Geometrie des Verbundes

Herausforderungen [Auszug]

- Adhäsionsneigung von metallischem Lithium beim Kalandrieren

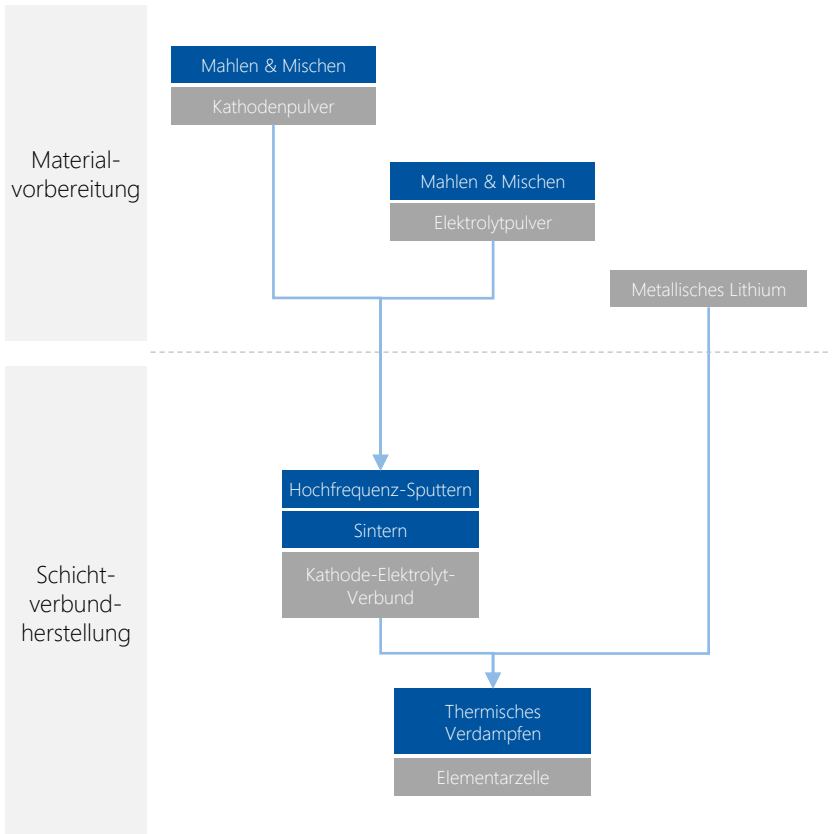
Technologiealternativen [Auszug]

- Pressen und anschließendes Sintern

Produktionsprozess

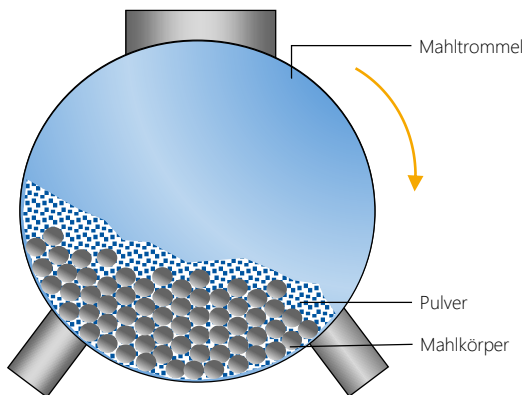
Elektroden- und Elektrolytfertigung: Alternative B

- Hauptmerkmal der im Folgenden vorgestellten Prozesskette B ist ein Physical Vapor Deposition-Prozess (PVD), mit dem die einzelnen Schichten der Reihe nach aufgetragen werden.
- Diese Prozesskette eignet sich vor allem für Oxid-basierte All-Solid-State-Batterien und zeigt Fertigungsschritte einer Dünnschichtzelle.



Mahlen & Mischen

Materialvorbereitung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Das Kathoden- sowie das Elektrolytpulver werden jeweils separat in einer Kugelmühle hergestellt.
- Dazu werden die jeweiligen Ausgangsmaterialien in eine zylindrische Mahlstrommel gegeben. In dieser Mahlstrommel befinden sich Kugeln, welche als Mahlkörper eingesetzt werden.
- Durch die Rotationsbewegungen des Zylinders werden die Ausgangsmaterialien vermischt. Des Weiteren sorgt die Rotationsbewegung für eine Relativbewegung zwischen den Mahlkörpern und dem Ausgangsmaterial, wodurch letzteres gemahlen wird.
- Anschließend wird das Pulver kalziniert, um die gewünschten Pulvereigenschaften zu erhalten.

Prozessparameter & -anforderungen

- Kugelmateriale
- Drehzahl
- Mahldauer
- Zylindermateriale
- Menge der Ausgangsmaterialien

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Mittlere Pulverteilchengröße
- Homogenität des Pulvers (Durchmischungsgrad)

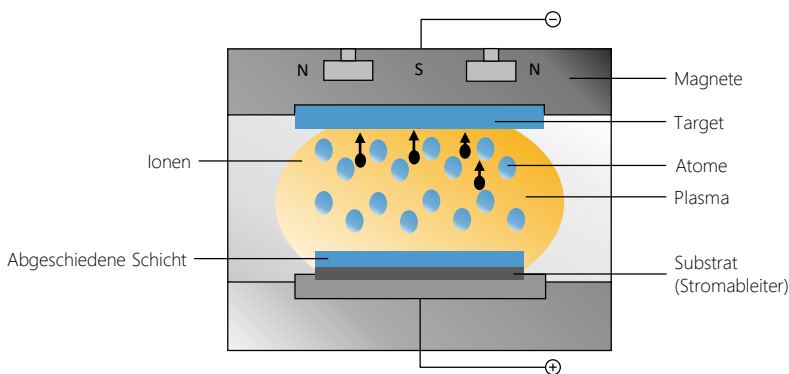
Herausforderungen [Auszug]

Technologiealternativen [Auszug]

- Sol-Gel-Verfahren

Hochfrequenz-Sputtern

Schichtverbundherstellung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Aus dem Kathoden- und dem Elektrolytpulver werden mittels Hochfrequenz-Sputtern die Kathoden- sowie die Elektrolyt-Schicht aufgebaut. Zunächst wird dazu aus den Pulvern durch Matrizen- oder Heißpressen jeweils das Target für den Sputter-Prozess hergestellt.
- Der Stromableiter ist gleichzeitig das Substrat des Prozesses. Auf diesen wird im ersten Schritt die Kathodenschicht abgeschieden. Anschließend erfolgt die Abscheidung einer Elektrolyt-Schicht auf die Kathodenschicht.
- Das Target des Sputter-Prozesses wird mit Ionen beschossen. Dabei werden Atome aus dem Target geschlagen, die in die Gasphase übergehen und zum Substrat beschleunigt werden. An der Oberfläche des Substrats wird die Schicht somit Atom für Atom aufgebaut.

Zusätzliche Informationen

- Das Hochfrequenz-Sputtern findet in einer Vakuumkammer statt.

Prozessparameter & -anforderungen

- Temperatur
- Abscheidedauer
- Prozessdruck
- Atmosphäre
- Prozessleistung/Leistungsdichte
- Targetdurchmesser & Targetdistanz

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Schichtdicke des Stromableiters
- Schichtdicken der Kathode und des Elektrolyten

Herausforderungen [Auszug]

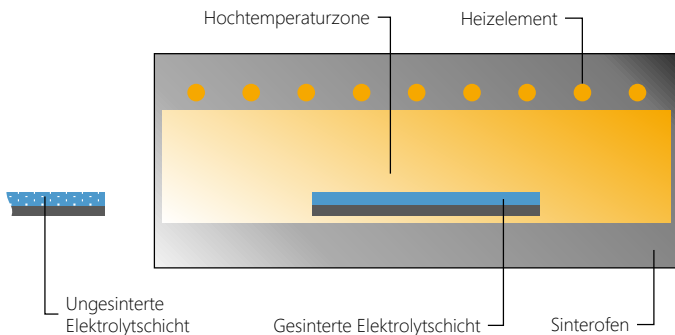
- Langsamer Prozess mit geringer Durchsatz
- Geringe Schichtdicken führen zu geringen Energiedichten

Technologiealternativen [Auszug]

- Chemical Vapor Deposition

Sintern

Schichtverbundherstellung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Das Sintern verdichtet die Kathoden- und Elektrolyt-Schicht. Damit kann der Widerstand an der Grenzfläche Elektrolyt – Elektrode durch die Verbesserung des Verbunds der beiden Schichten verringert werden.
- Der Kathode-Elektrolyt-Verbund durchläuft einen Sinterofen. Das Material wird darin auf eine Temperatur unterhalb des Schmelzpunkts erwärmt.
- Je nach gewählten Prozessparametern kann die resultierende Porosität der Materialien eingestellt werden.

Zusätzliche 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 Festkörperperlektrolyten notwendig, um einen ausreichend geringen Grenzflächenwiderstand zu erzielen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Sinter Temperatur (800°C – 1000°C beim Hochtemperaturesintern, je nach Material bis zu 1300°C)
- Sinterdruck (Sintern bei Atmosphärendruck bevorzugt)
- Sinterzeit (i.d.R. mehrere Stunden)

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Verbundhaftung
- Porosität
- Resultierender Grenzflächenwiderstand

Herausforderungen [Auszug]

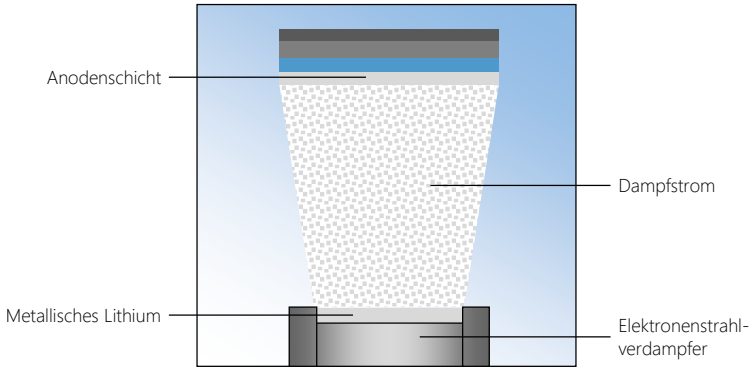
- Kompatibilität der Sinter Temperaturen unterschiedlicher Materialien
- Hoher Energieeinsatz für hohe Sinter Temperaturen

Technologiealternativen [Auszug]

- Laserbasierte Prozesse

Thermisches Verdampfen

Schichtverbundherstellung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Das thermische Verdampfen eignet sich zum Auftrag der Anode auf den Kathode-Elektrolyt-Verbund. Als Anodenmaterial wird dafür metallisches Lithium eingesetzt.
- Beim thermischen Verdampfen wird das metallische Lithium z.B. durch einen Elektronenstrahlverdampfer auf Temperaturen um den Siedepunkt erhitzt, sodass dieses in die Dampfphase übergeht. Der Dampf breitet sich homogen in der Vakuumkammer aus.
- Der Schichtaufbau erfolgt durch Kondensation an der Oberfläche des Elektrolyten, da dieser eine geringere Temperatur aufweist.

Zusätzliche Informationen

- Das thermische Verdampfen findet wie das Sputtern in einer Vakuumkammer statt.

Prozessparameter & -anforderungen

- Stromstärke
- Widerstand
- Abscheidedauer
- Prozessdruck und -temperatur
- Kondensationsrate
- Abstand zur Verdampfungsquelle

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Schichtdicke der Anode
- Schichtreinheit

Herausforderungen [Auszug]

- Lange Durchlaufzeiten
- Geringe Schichthaftung

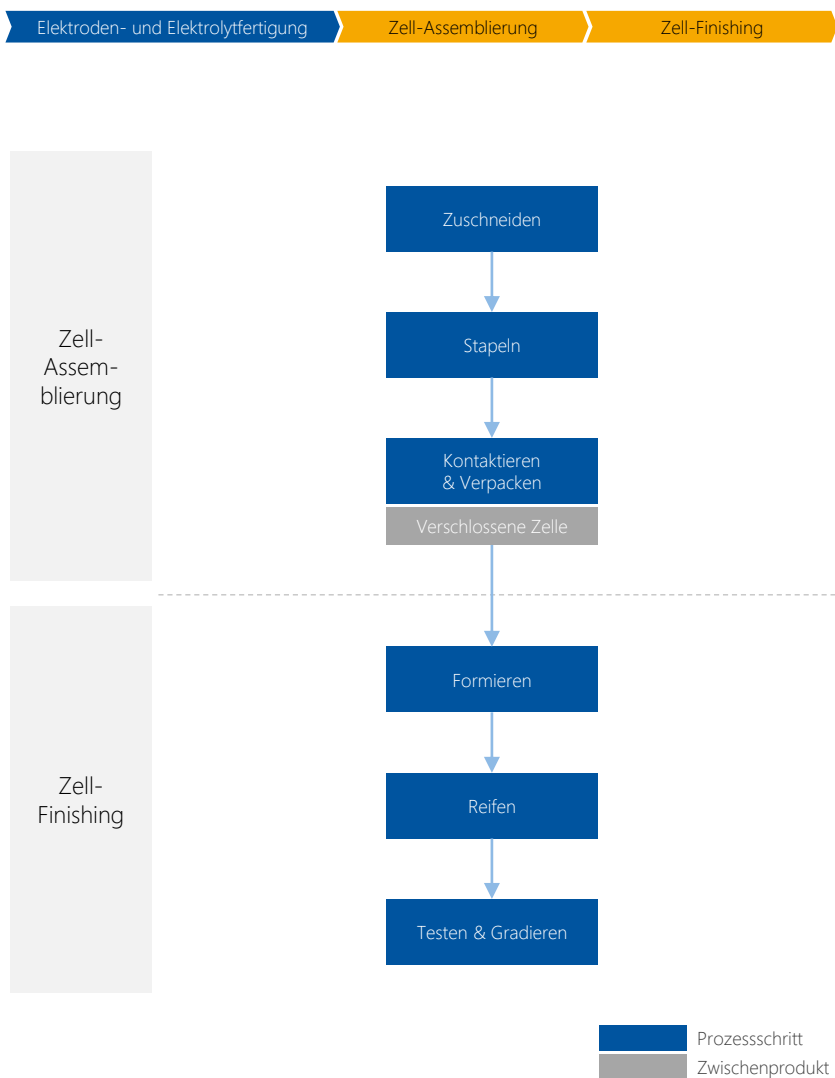
Technologiealternativen [Auszug]

- CVD-Prozess

Produktionsprozess

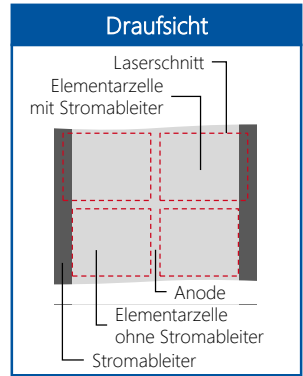
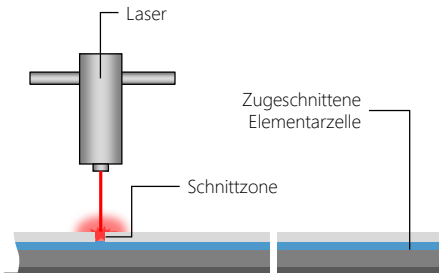
Zell-Assemblierung & Zell-Finishing

- Bei der Zellaussammlung wird die Batterie aus den bereits bestehenden Elementarzellen aufgebaut.
- Im Vergleich zur herkömmlichen Lithium-Ionen-Batteriefertigung kann die kosten- und zeitintensive Formierung und Reifung bei der All-Solid-State-Batterie vereinfacht werden. Außerdem entfällt das Befüllen mit Elektrolyt und das Entgasen.
- Zur Gradierung und Qualitätssicherung wird die Batterie verschiedenen Tests unterzogen.



Zuschneiden

Zell-Assemblierung



Elektroden- und Elektrolytfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Nach dem die Schichtlaminierung abgeschlossen ist, müssen die Elementarzellen zugeschnitten werden, damit diese im nächsten Prozessschritt gestapelt werden können. Dies kann durch einen Laserschnitt erfolgen.
- Als Laser kann zum Beispiel ein Faserlaser eingesetzt werden.
- Durch den korrekt eingestellten Energieeintrag in den Schichtverbund kann ein gratfreier Schnitt produziert werden. Dabei ist vor allem darauf zu achten, dass die jeweiligen Schichtmaterialien nicht aufgeschmolzen werden, was zu einer elektrischen Verbindung der Schichten und damit zum Kurzschluss führen würde.

Prozessparameter & -anforderungen

- Schnittgeschwindigkeit (z.B. 100 mm/s)
- Spotgröße (z.B. 25 μm)
- Impulsenergie und -dauer (z.B. 30 ns)
- Impulswiederholungsrate (z.B. 100 kHz)
- Laserleistung bzw. Streckenenergie
- Wellenlänge (z.B. 1064 nm)

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Wärmeeintrag
- Abmaße
- Gratfreie Kanten

Herausforderungen [Auszug]

- Gegenseitige Kontaminierung der Schichten
- Unterschiedliche Lasereinstellungen aufgrund der verschiedenen Materialien

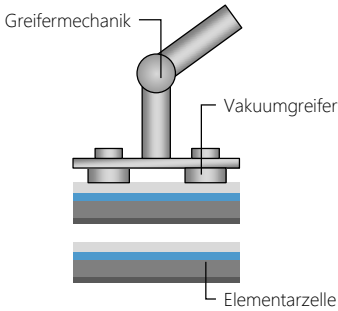
Technologiealternativen [Auszug]

- Stanzen

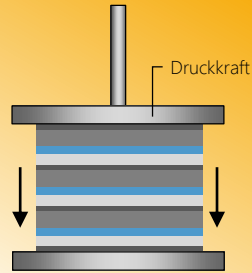
Stapeln

Zell-Assemblierung

Greifen & Stapeln



Zellstapel verbinden



Elektroden- und Elektrolytfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Die Elementarzellen können direkt bipolar gestapelt werden. Die so entstehende Serienverschaltung der Zellen ermöglicht eine vervielfachte Zellspannung.
- Die Elementarzellen werden mit Greifern übereinander positioniert. Bei der Auswahl der Greiftechnik ist auf die Beschädigungsfreiheit der Oberfläche zu achten.
- Zum Abschluss einer Zelle wird ein zusätzlicher Stromableiter benötigt.
- Anschließend werden die Elementarzellen durch Aufbringen von Druck und Wärme zusammenlaminiert. Es entsteht ein bipolarer Zellstapel.

Zusätzliche Informationen

- Weitere Vorteile des direkten Stapelns liegen in dessen Einfachheit und Effektivität. Zusätzliche Verpackungsaufwände werden minimiert.

Prozessparameter & -anforderungen

- Stapelgeschwindigkeit
- Positioniergenauigkeit
- Pressdruck
- Temperatur

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Positioniergenauigkeit
- Beschädigungsfreie Stapelung

Herausforderungen [Auszug]

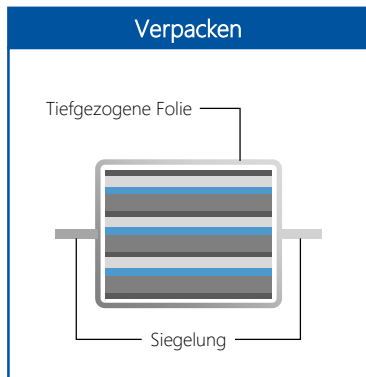
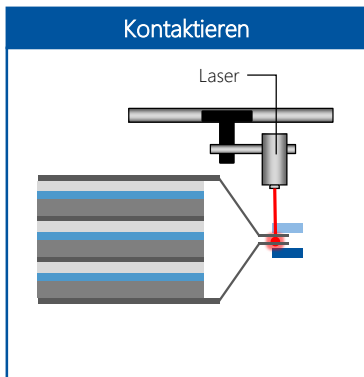
- Lange Prozesszeiten

Technologiealternativen [Auszug]

- Wickeln der Elementarzellen. Aufgrund des spröden Festkörperelektrolyten ist das Wickeln von All-Solid-State-Batterien jedoch sehr anspruchsvoll.

Kontaktieren & Verpacken

Zell-Assemblierung



Elektroden- und Elektrolytfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Bei der bipolar gestapelten Zelle müssen nur die beiden äußeren Stromableiter mit den Kontaktfahnen kontaktiert werden. Als Zellverbinder kann potenziell auf kostengünstigere Materialien zurückgegriffen werden.
- Die Kontaktierung kann mittels Laserstrahl- oder Ultraschallschweißen erfolgen.
- Nach der Kontaktierung wird die All-Solid-State-Batteriezele in eine elektrisch isolierte Verpackung eingebracht und versiegelt, damit diese vor Umwelteinflüssen geschützt wird. Als Verpackungsmaterialien eignen sich Folien aus Metall-Kunststoff-Mischungen.
- Die äußeren Stromableiter müssen elektrisch isoliert in die Folie eingebracht werden. Die Verpackung wird über Impuls- oder Kontaktsiegeln vollständig verschlossen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Pulszeit
- Wärmeeindringtiefe
- Laserleistung
- Siegelzeit
- Siegeldruck
- Siegeltemperatur

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Stoffschlüssige Kontaktierung
- Qualität der Versiegelung

Herausforderungen [Auszug]

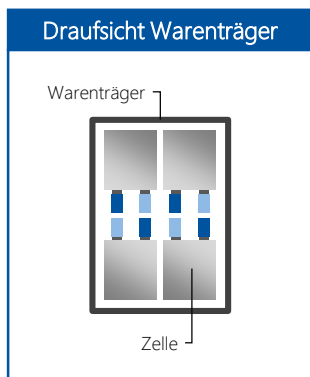
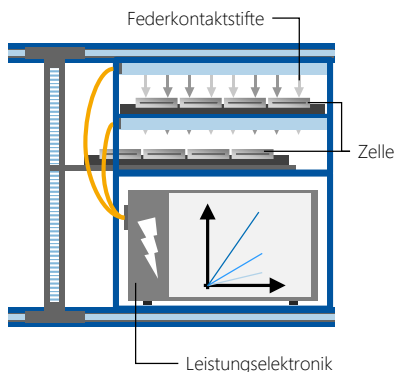
- Mögliche Schädigung der Lithiumschicht
- Mögliche Lochbildung in den Fügepartnern

Technologiealternativen [Auszug]

- Technologie

Formieren

Zell-Finishing



Elektroden- und Elektrolytfertigung

Zell-Assemblierung

Produktionsablauf

- 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.
- Die Zelle wird in Formationsregalen durch Federkontaktstifte kontaktiert.

Zusätzliche Informationen

- In der Zelle bildet sich eine Grenzschicht zwischen Elektrolyt und Elektroden aus. Diese Schicht beeinflusst maßgeblich die Ionen-Leitfähigkeit und damit die Performance der Zelle. Im Vergleich zur Lithium-Ionen-Batterie ist diese Schicht jedoch dünner und verändert sich nach wenigen Zyklen nicht mehr.
- Bereits nach einem Entlade-/Ladezyklus bleiben die Kapazität und der Innenwiderstand der Batteriezelle weitgehend konstant.
- Im Vergleich zur Lithium-Ionen-Zelle ist mit erheblich geringerem Zeit- und Kosten-Aufwand bei der Formation zu rechnen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Definierte C-Rate für ersten Entlade- und Ladevorgang
- Sukzessive Steigerung der C-Rate
- Strom- und Spannungsverlauf
- Geringe Übergangswiderstände an den Federkontaktstiften

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Ausbildung der Grenzschicht
- Innenwiderstand der Zelle

Herausforderungen [Auszug]

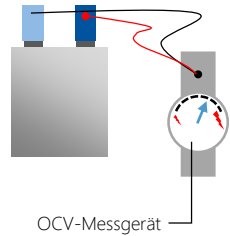
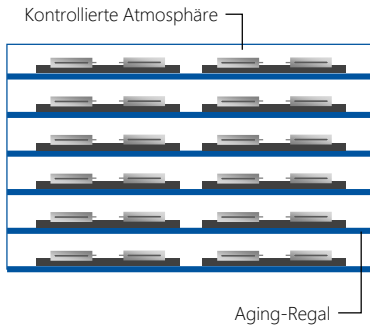
- Lage der Zellen
- Kontaktierungsart
- Prozesstemperatur

Technologiealternativen [Auszug]

- Die Formierung basiert häufig auf großem Erfahrungswissen, welches für All-Solid-State-Batterien aufgrund fehlender Serienreife noch nicht existiert.

Reifen

Zell-Finishing



Elektroden- und Elektrolytfertigung

Zell-Assemblierung

Produktionsablauf

- Die Reifung, auch Aging genannt, stellt den finalen Schritt der Zellfertigung dar und dient der Qualitätssicherung.
- Während des Reifens werden unter kontrollierte Atmosphärenbedingungen Veränderungen der Zelleigenschaften bzw. Zellperformance durch regelmäßige Messung der Leerlaufspannung der Zelle überprüft.
- Die Zellen lagern dazu in Aging-Regalen und/oder -türmen.

Zusätzliche Informationen

- Im Vergleich zur Lithium-Ionen-Batterie wird eine kürzere Aging-Dauer erwartet, da aufgrund des festen Elektrolyten schneller stabile Eigenschaften der Zelle erreicht werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Ladezustand der Zelle zu Beginn der Reifung
- Agingdauer
- Kontrollierte Umgebungsbedingungen

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Kapazität
- Innenwiderstand
- Selbstentladung
- Coulomb-Effizienz

Herausforderungen [Auszug]

- Packungsdichte der Zellwarenträger

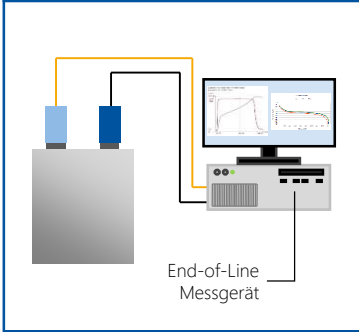
Technologiealternativen [Auszug]

- Das Reifen basiert häufig auf großem Erfahrungswissen, welches für All-Solid-State-Batterien aufgrund fehlender Serienreife noch nicht existiert.

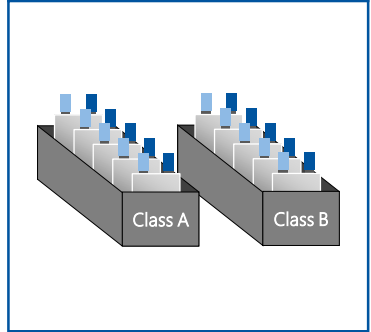
Testen & Gradieren

Zell-Finishing

Testen



Grading (Klassierung)



Elektroden- und Elektrolytfertigung

Zell-Assemblierung

Produktionsablauf

- Die fertig produzierte Batteriezelle wird in einem finalen Schritt hinsichtlich ihrer Eigenschaften getestet.
- Hierzu zählt neben einer optischen Prüfung auf Beschädigungen vor allem die Charakterisierung der elektrochemischen Eigenschaften.
- Anhand der Messergebnisse sowie der während der Formierung bestimmten Kapazität werden die All-Solid-State-Batterien entsprechend der elektrochemischen Eigenschaften in Klassen eingeteilt, was als Gradieren bezeichnet wird.

Zusätzliche Informationen

- Für das Gradieren gibt es keine Norm, sodass verschiedene Klassen keine direkten Rückschlüsse auf die Qualität zulassen, sondern lediglich Zellen mit ähnlichen Eigenschaften zusammenfassen.

Prozessparameter & -anforderungen

- C-Rate beim Laden
- Ladezustand für den anschließenden Versand
- Verlustrate

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Kapazität
- Innenwiderstand
- Zellspannung

Herausforderungen [Auszug]

- Bildung sinnvoller Klassen
- Zellhandling

Technologiealternativen [Auszug]

- Keine Normung der Tests & Klassen, daher verschiedene Abfolgen möglich