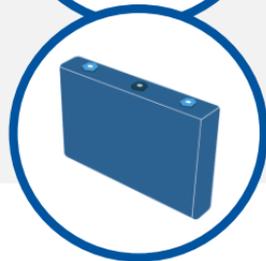
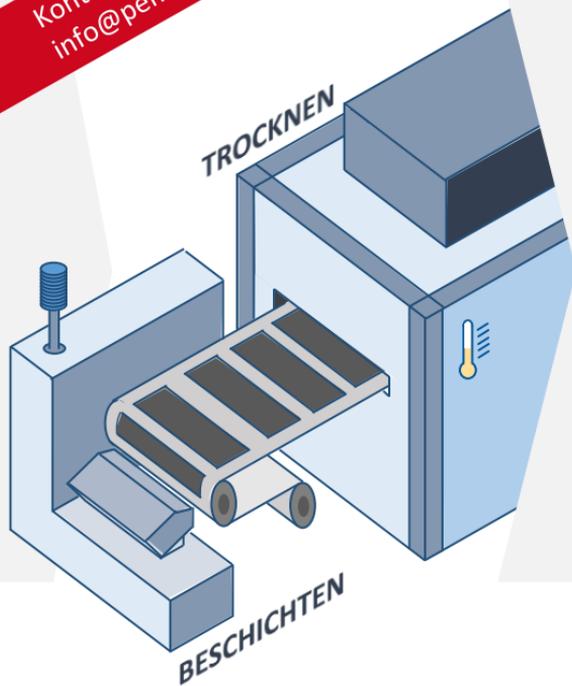


Auch als kostenlose
Broschüre erhältlich
Kontaktieren Sie uns unter:
info@pem.rwth-aachen.de



PRODUKTIONSPROZESS EINER LITHIUM-IONEN- 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.

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 Batterieherstellung: Von der Rohstoffaufbereitung, Elektrodenproduktion und Zellausbringung bis hin zur Modul- und Packfertigung.



PEM

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

www.pem.rwth-aachen.de

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



Christoph Lienemann, M. Sc. M. Sc.
Gruppenleiter Battery Production
C.Lienemann@pem.rwth-aachen.de



Marc Locke, M. Sc.
Battery Production
M.Locke@pem.rwth-aachen.de



Christian Offermanns, M. Sc.
Battery Production
C.Offermanns@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



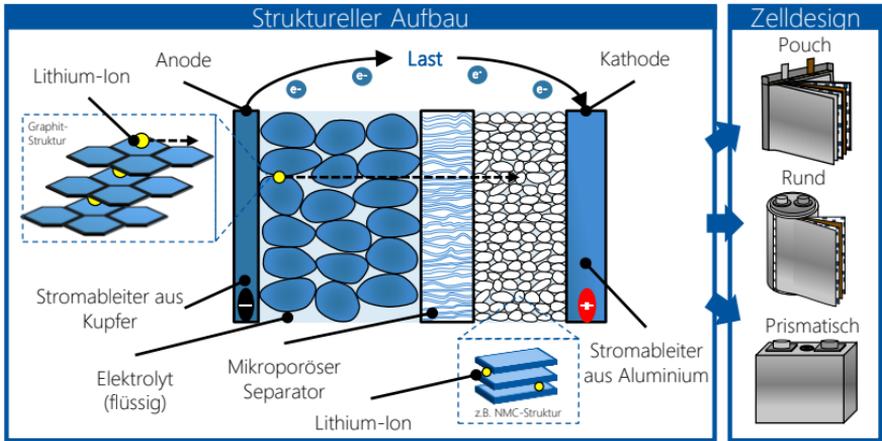
Haben Sie Fragen?

Sprechen Sie uns an!



Funktionsprinzip

einer Lithium-Ionen-Batteriezelle



Elektrodenfertigung

Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

- Die Herstellung der Lithium-Ionen-Batteriezelle umfasst die drei Hauptprozessschritte Elektrodenfertigung, Zell-Assemblierung sowie das Zell-Finishing.
- Die Elektrodenfertigung und das Zell-Finishing sind weitestgehend unabhängig von dem Zelltyp durchzuführen, während innerhalb der Zell-Assemblierung zwischen Pouch- und Rundzelle sowie der Prismatischen Zelle zu unterscheiden ist.
- Unabhängig vom Zelltyp besteht die kleinste Einheit jeder Lithium-Ionen-Zelle aus zwei Elektroden und dem Separator, der die Elektroden voneinander trennt. Dazwischen befindet sich der ionenleitfähige Elektrolyt.

Technologieentwicklung

einer Lithium-Ionen-Batteriezelle

Produktinnovation (Auszug)

- **Permutationen**
 - NMC 811 (High-Nickel Batterien)
 - Silizium-Graphit Anoden (Si/C)
- **Trägermaterialien und Elektrolyte**
 - Streckgitter
 - Festkörperelektrolyte
- **Vierte Technologie-Generation**
 - Großformatige Zellen
 - Metallische Li-Anoden

Prozessinnovation (Auszug)

- **Elektrodenfertigung**
 - Extrudieren
 - Lasertrocknen
- **Zell-Assemblierung**
 - Laserschneiden
 - Laminieren des Separators
- **Zell-Finishing**
 - Integrierte Warenträgerkonzepte
 - Energierückgewinnung

- Bereits heute bekannte Technologieentwicklungen werden die Material- und Fertigungskosten der Lithium-Ionen-Batteriezelle senken und die Leistungseigenschaften weiter steigern.

Mischen



Elektrodenfertigung

Anodenrezeptur*

Aktivmaterial:

Graphit (90 Gew.-%)

Leitruß: nanomikroskopischer

Kohlenstoff, z.B. Super P® (5 Gew.-%)

Lösungsmittel:

Entionisiertes Wasser

Binder: CMC (3 Gew.-%)

Additiv: SBR (2 Gew.-%)

Kathodenrezeptur*

Aktivmaterial: Li(NiMnCo)O₂ (90 Gew.-%)

Leitruß: nanomikroskopischer Kohlenstoff, z.B. Super P® (5 Gew.-%)

Lösungsmittel: N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP)

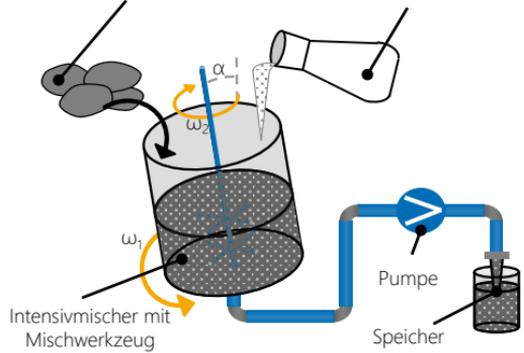
Binder: PVDF (5 Gew.-%)

Schritt I: Mischen (trocken)

Aktivmaterial und ggfs. Additive wie Leitruß sowie Binder werden trocken durchmischt

Schritt II: Dispergieren (nass)

Lösungsmittel zugeben, dispergieren und homogenisieren



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Durch Energieeintrag werden mindestens zwei voneinander getrennte Ausgangsstoffe über ein rotierendes Werkzeug zu einem sogenannten Slurry verbunden.
- Die Herstellung des Slurrys erfordert neben den Aktivmaterialien auch Leitadditive, Lösungs- sowie Bindemittel.
- Es wird zwischen Mischen (Trockenmischung) und Dispergieren (Nassmischung) unterschieden. Darüber hinaus kann der Prozess unter Vakuum durchgeführt werden, um Gaseinschlüsse zu vermeiden.
- Die Wahl der Misch- und Dispergierreihenfolge ist auf das zu fertigende Elektrodendesign abzustimmen.

Zusätzliche Informationen

- Der Weitertransport zum Prozessschritt „Beschichten“ erfolgt durch Rohrleitungen oder in atmosphärisch abgedichteten Speichern.
- Aktivmaterialien, Leitadditive, Lösungs- sowie Bindemittel sind für viele Zellhersteller Zukaufkomponenten.

Prozessparameter & -anforderungen

- α : 0° - 10°
- Mischdauer: 30 min bis 5 h
- Temperierung: 20°C bis 40°C
- Atmosphäre: Schutzgas, Vakuum, Raumluft (Reinraum)
- Unterschiedliche Mischer für Anode und Kathode zur Vermeidung von Kreuzkontamination

Technologiealternativen [Auszug]

- Verschiedene Mischtechnologien und Mischwerkzeuge: Intensivmischer, Planetenmischer, Dispergierer, etc.
- Kontinuierliches Mischen: Die Aktivmaterialien und die Additive werden in einem kontinuierlichen Prozess (Extruder) vermischt. Das Slurry wird anschließend gespeichert oder direkt über Rohrleitungen zu der Beschichtungsanlage transportiert.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Misch- und Dispergierreihenfolge
- Filtermaterialien und Filtersysteme
- Scherkräfte
- Mischtemperatur

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Homogenität des Slurrys
- Leitrußpartikelgröße
- Reinheit (Fremdkörpergehalt)
- Viskosität

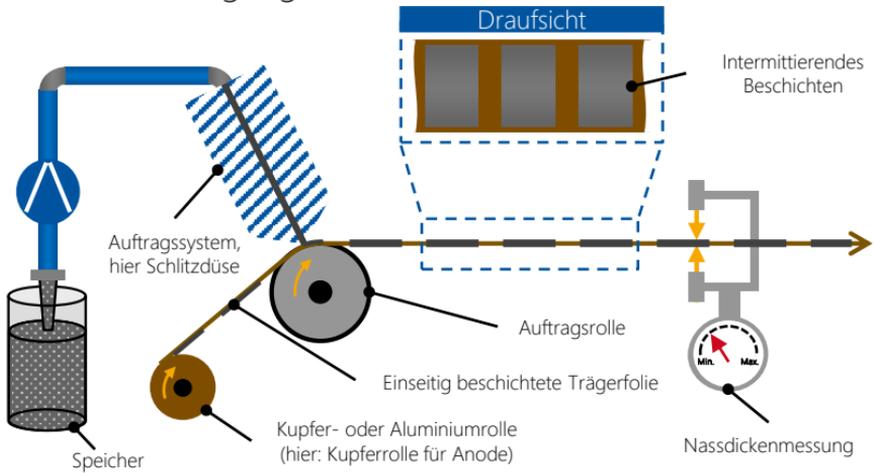
Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 18-34 Mio. € (Mischen)

* Studie des PEM der RWTH Aachen: ca. 45.000.000 Pouchzellen/a, Zellkapazität: 25 Ah, 4 GWh/a

Beschichten

Elektrodenfertigung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Die Trägerfolie wird mit dem Slurry über ein Auftragswerkzeug (z.B. Schlitzdüse, Raket, Rasterwalze) beschichtet.
- Die Folie wird in Beschichtungsrichtung entweder kontinuierlich oder intermittierend beschichtet.
- Die Beschichtung von Folienseiten erfolgt in der Regel sequentiell.
- Die beschichtete Trägerfolie wird kontinuierlich in den anschließenden Trockner überführt. Nach dem ersten Trocknungsprozess wird die einseitig beschichtete Trägerfolie durch einen manuellen Transportprozess erneut der Beschichtungsanlage zugeführt.
- Abschließend wird die zweite Folienseite nach dem beschriebenen Ablauf beschichtet.

Zusätzliche Informationen

- Aluminiumfolie (gewalzt) und Kupferfolie (gewalzt oder elektrolytisch hergestellt) sind Zukaufkomponenten des Zellherstellers.
- Die Foliendicken (Anode - Kupferfolie und Kathode - Aluminiumfolie) schwanken je nach Zelldesign zwischen 5 μm und 25 μm .

Prozessparameter & -anforderungen

- Trockenschichtdicke pro Seite: 50 μm – 100 μm (Anode), 40 μm – 80 μm (Kathode)
- Beschichtungsgeschwindigkeit: 35 m/min – 80 m/min
- Beschichtungsbreite: bis zu 1500 mm
- Beschichtungsgenauigkeit trocken ($\pm 2 \text{ g/m}^2$)

Technologiealternativen [Auszug]

- Verschiedene Auftragswerkzeuge (z.B. Schlitzdüse, Comma-Bar, Rasterwalze)
- Simultane Beschichtung: Die Folienseiten sowie die Folienseiten werden gleichzeitig durch zwei gegenüberliegende Auftragswerkzeuge beschichtet.
- Trockenbeschichtung: Bei der Trockenbeschichtung wird das Aktivmaterial in Pulverform ohne Lösungsmittel auf die Trägerfolie aufgebracht.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Qualitätsüberwachung (Oberflächenqualität, Schichtdicke)
- Auftragswerkzeug
- Präzision der Slurypumpe

Qualitätsmerkmale [Auszug]

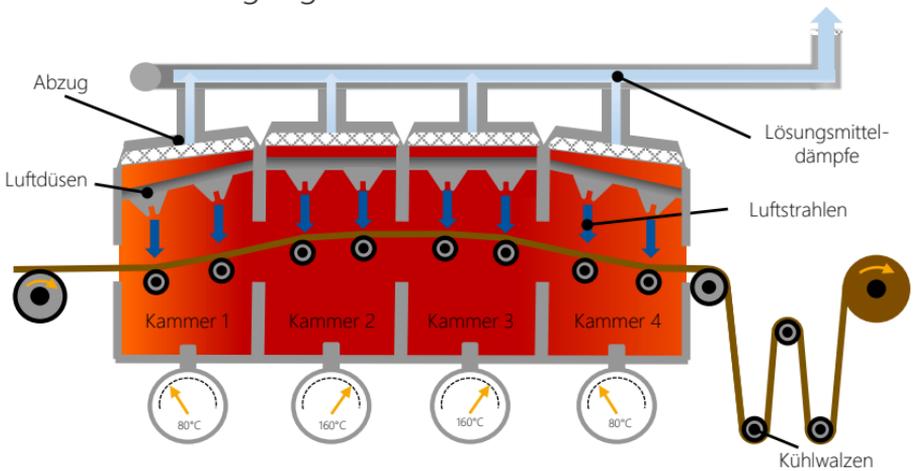
- Schichtdickengenauigkeit (Homogenität in und quer zu der Beschichtungsrichtung)
- Oberflächenqualität (Lunker, Partikel)
- Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 16-35 Mio. €
(Beschichten & Trocknen)

Trocknen

Elektrodenfertigung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Nach dem Beschichten wird das aufgetragene Aktivmaterial in einem kontinuierlichen Prozess getrocknet.
- Das Lösungsmittel wird dem Material durch Wärmezufuhr entzogen.
- Das in der Kathodenbeschichtung enthaltene, hochentzündliche Lösungsmittel wird zurückgewonnen oder der thermischen Verwertung zugeführt.
- Der Transport der Folie wird entweder durch Rollen- oder Schwebebahnssysteme realisiert. Bei einer simultanen, doppelseitigen Beschichtung ist ein Schwebebahntrockner zu verwenden.
- Der Trockner ist zur Realisierung eines individuellen Temperaturprofils in unterschiedliche Temperaturzonen unterteilt. Diese werden im Normalfall durch ein Kammersystem realisiert.
- Nach dem Trocknerdurchlauf werden die Folien auf Raumtemperatur heruntergekühlt und je nach Anlagentyp wieder aufgewickelt (konventionell) oder direkt auf der zweiten Seite beschichtet (Tandem-Beschichtung).

Zusätzliche Informationen

- Die Durchlaufgeschwindigkeit bei der Beschichtung definiert die Länge der Trocknerstrecke.

Prozessparameter & -anforderungen

- Trocknungsgeschwindigkeit: 35 m/min – 80 m/min
- Trocknungsstrecke: bis zu 100 m
- Temperaturprofil in den Trocknerzonen: 50°C – 160°C
- Lösemittelrückgewinnung (Gefahrstoffe); Thermische Nachverbrennung
- Geeignete Folienvorspannung zur Vermeidung von Folienrissen wichtig

Technologiealternativen [Auszug]

- Infrarot-trocknung: Die konventionellen Konvektionstrockner können durch Infrarotheizung ergänzt und so effizienter gestaltet werden.
- Lasertrocknung: Durch den Einsatz eines Lasers kann die Trocknerlänge verkürzt und Energiekosten gespart werden. Diese Technologie befindet sich noch in der Entwicklungsphase.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Bestimmung der Prozessparameter in Abhängigkeit des Elektroden-Designs
- Wahl der Folienvorspannung
- Temperaturprofil

Qualitätsmerkmale [Auszug]

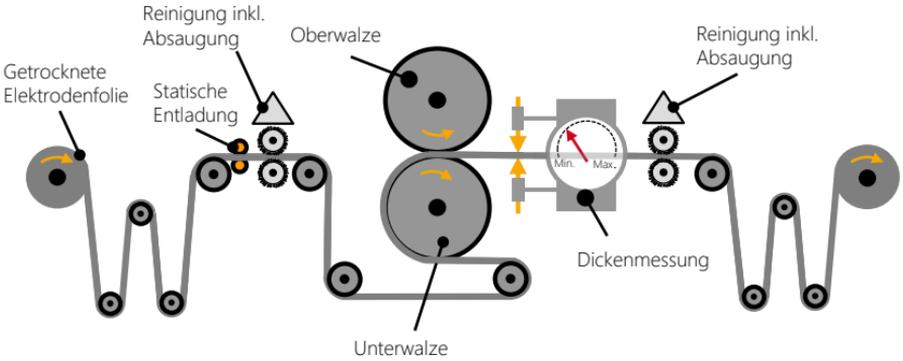
- Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat
- Restfeuchte
- Oberflächenbeschaffenheit (Risse, Einschlüsse, etc.)

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 16-35 Mio. €
(Beschichten & Trocknen)

Kalandern

Elektrodenfertigung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Beim Kalandern wird die beidseitig beschichtete Kupfer- bzw. Aluminiumfolie durch ein rotierendes Walzenpaar verdichtet.
- Vorher wird die Elektrodenfolie statisch entladen und durch Bürsten oder Luftströme gereinigt.
- Die Verdichtung des Materials erfolgt durch die Ober- und Unterwalze.
- Das Walzenpaar erzeugt einen genau zu definierenden Liniendruck.
- Nach dem Kalandern wird die Elektrodenfolie erneut gereinigt und wieder aufgerollt (Rolle-zu-Rolle Prozess).

Zusätzliche Informationen

- Der Liniendruck definiert die Porosität des beschichteten Materials und beeinflusst somit das spätere Benetzungsverhalten der Elektroden und die Energiedichte der Zelle.
- Ein zu hoch eingestellter Liniendruck erzeugt einen Quetschvorgang und führt zu Spannungsrissen.
- Die Sauberkeit des Walzenpaares ist für die Vermeidung des Eindringens von Fremdpartikeln in das Substratmaterial entscheidend.

Prozessparameter & -anforderungen

- Einhaltung eines konstanten Liniendrucks von bis zu 2.500 N/mm
- Kalandergeschwindigkeit: 60 m/min – 100 m/min
- Porosität wird von 50% (nach dem Trocknen) durch das Kalandern auf 20% bis 40% reduziert (Definiert über die Spaltweite)
- Vorheizstrecken und Walzentemperatur optional möglich (ca. 50°C – 250°C)

Technologiealternativen [Auszug]

- Heißwalzen: Je nach Anlagenkonzept können die Ober- und Unterwalze beheizt werden. So kann die Duktilität des Aktivmaterials auf einen definierten Wert gebracht werden. Als Heizmedium werden in der Regel Wasser oder Öl verwendet.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Liniendruck
- Walzenmaterial und Durchmesser
- Oberflächen- und Rundlaufgenauigkeit der Walzenpaare
- Walzentemperatur

Qualitätsmerkmale [Auszug]

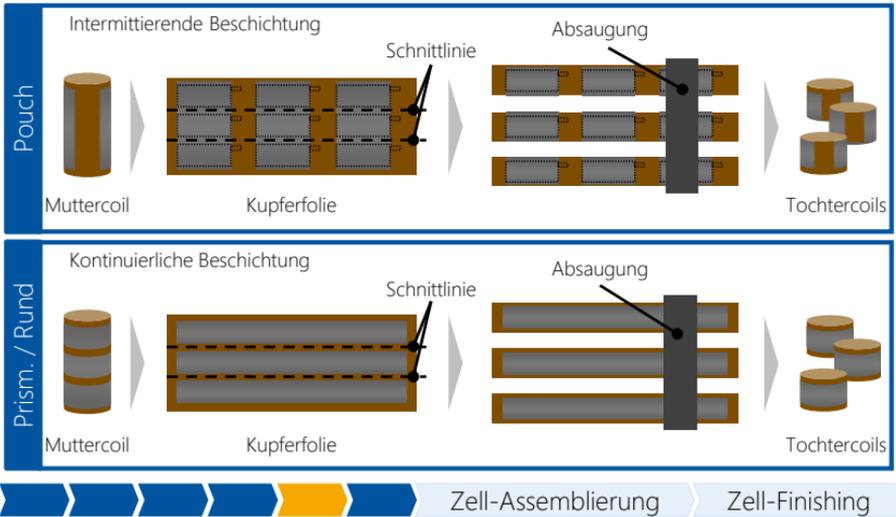
- Definierte Porosität
- Oberflächenstruktur
- Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 5-10 Mio. €
(Kalandern)

Slitting

Elektrodenfertigung



Produktionsablauf

- Die kalandrierten Muttercoils werden meist durch einen manuellen Transportprozess der Slitting-Anlage zugeführt.
- Das Slitting ist ein Trennvorgang, bei dem ein breites Elektrodenband (Muttercoil) in mehrere, kleinere Elektrodenbänder (Tochtercoils) unterteilt wird.
- In der Regel werden hierzu rollierende Messer verwendet.
- Die einzelnen Tochtercoils werden nach dem Schneidprozess gereinigt und wieder aufgerollt (Rolle-zu-Rolle Prozess).

Zusätzliche Informationen

- Das Reinigen der Elektrodenbänder erfolgt durch eine Absaugung und/oder eine Bürste.
- Die Schnittgüte der Elektrodenränder sowie die Sauberkeit der Folienbahn stellen zentrale Qualitätskriterien dar.
- Die Schnittbreite der Tochtercoils kann je nach Zelldesign variieren und beträgt in vielen Anwendungsfällen zwischen 60 mm und 300 mm.

Prozessparameter & -anforderungen

- Schnittgeschwindigkeit (mechanisch): 80 m/min – 150 m/min
- Absaugung für die abgetrennten Randstreifen
- Schnittbreitentoleranz: $\pm 150 \mu\text{m}$ bis $\pm 250 \mu\text{m}$
- Gratfreies Schneiden

Technologiealternativen [Auszug]

- Laserslitting: Für den Schneidprozess kann auch ein Laser verwendet werden. Diese Technologie bietet eine höhere Flexibilität. Das Risiko von Beschädigungen am Aktivmaterial oder Verunreinigungen durch Stäube nimmt bei Verwendung des Laserslittings jedoch zu.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Beschichtung der Schneidmesser
- Prozessparameter in Abhängigkeit von der Beschichtungsdicke
- Absaugung von Stäuben / Schneidabfällen

Qualitätsmerkmale [Auszug]

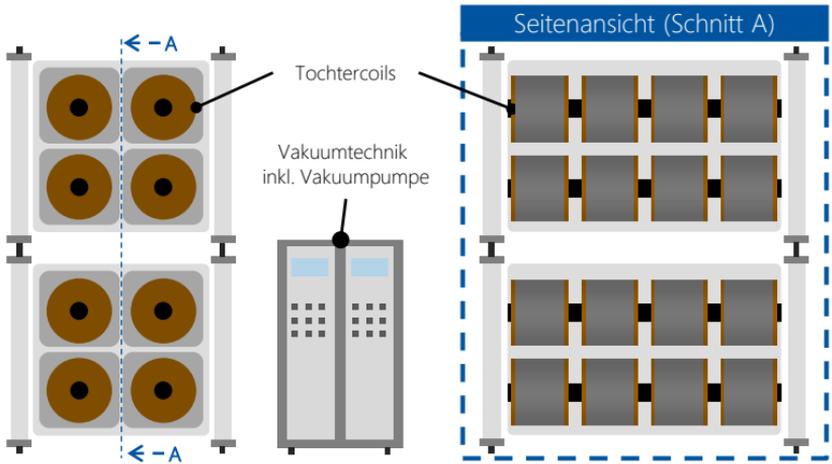
- Kantengeometrie (Schneidgrat)
- Thermische (Temperatureinflusszone) und mechanische Belastung
- Verunreinigung durch Partikel bei dem Schneidvorgang

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 3-8 Mio. €
(Slitting)

Vakuumtrocknen

Elektrodenfertigung



Zell-Assemblierung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Die beschichteten Tochtercoils werden auf einen Spezialwarenlagerer aufgeschoben.
- Im Anschluss findet eine Lagerung der Coils im Vakuumofen statt.
- Die Trocknungszeit beträgt ca. 12 h bis 30 h. Während des Trocknungsprozesses werden Restfeuchte und Lösungsmittel aus den Coils entzogen.
- Die Senkung der Restfeuchte wird durch Verdampfen bei niedrigen Temperaturen in Folge eines niedrigen Totaldrucks realisiert.
- Nach Abschluss des Vakuumtrocknens werden die Coils direkt in den Trockenraum überführt oder unter Vakuum trocken verpackt.

Zusätzliche Informationen

- Die Vakuumöfen werden für die Tochtercoils häufig als Schleuse in den Trockenraum verwendet.
- Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Vakuumöfen mit Inertgas zu betreiben, um Korrosionsvorgänge zu verhindern.

Prozessparameter & -anforderungen

- Arbeitsdruck: $0,07 \text{ mbar} < p < 1000 \text{ mbar}$
- Trocknungsdauer: 12 - 30 h/Charge
- Trocknungstemperatur: $60^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C}$
- Inertgaszuführung

Technologiealternativen [Auszug]

- Kontinuierliche Trockner: Im Gegensatz zu dem Kammerkonzept existieren auch kontinuierliche Trocknungsprozesse, in denen die Tochtercoils im auf- oder abgewickelten Zustand durch eine lange Trocknungsanlage transportiert werden.
- Infrarottrockner: Beide Technologien können durch eine Infrarotheizung ergänzt werden.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Konstante Wärmezufuhr und stabiles Vakuum
- Längere Liegezeiten nur im Trockenraum möglich
- Inertgaszuführung gegen Kupferkorrosion

Qualitätsmerkmale [Auszug]

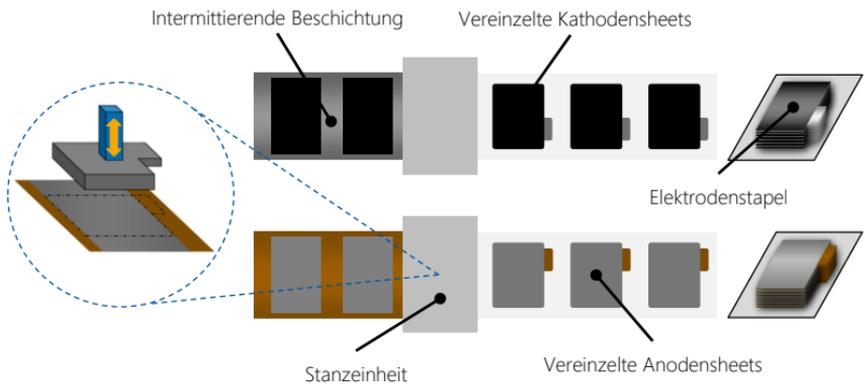
- Oberflächenbeschaffenheit (Risse, etc.)
- Restfeuchtegehalt (keine Restfeuchte erwünscht)

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 6-12 Mio. €
(Vakuumtrocknen)

Vereinzeln

Zell-Assemblierung



Elektrodenfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Das Vereinzeln ist für die Fertigung der Pouchzelle erforderlich und bezeichnet das Heraustrennen von Anoden-, Kathoden- und Separator sheets aus der Rollenware (Tochtercoil).
- Die getrockneten Tochtercoils werden abgewickelt und dem Vereinzelnwerkzeug zugeführt.
- Der Trennvorgang wird in der Regel mit einem Scherschnitt (Stanzwerkzeug) in einem kontinuierlichen Prozess durchgeführt.
- Die vereinzelt (doppelseitig beschichteten) Sheets werden je nach Anlagenkonzept in einem Magazin gespeichert oder direkt in den nächsten Prozessschritt überführt.

Zusätzliche Informationen

- Der unbeschichtete Randbereich des Sheets dient in einem späteren Prozessschritt zum Anschweißen der Kontaktfahne.
- Der Verschnitt sowie die Schneidstäube werden im Prozess aufgefangen und abtransportiert.

Prozessparameter & -anforderungen

- Vereinzlungszeit Stanzen: ca. 0,2 s/Sheet
- Toleranzanforderungen: ca. $\pm 200 \mu\text{m}$ Breiten- und Längentoleranz für die Sheets
- Stanzwerkzeug: Sehr gute Schnittkantenqualität (in Abhängigkeit der Verschleißfestigkeit)

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Wärmeeinflusszone und Absaugung des verdampften Materials bei dem Laserschnitt
- Beschichtung der Werkzeuge
- Schnitt-/Stanzgeschwindigkeit

Technologiealternativen [Auszug]

- Laser-Ablation: Durch einen geführten Laserstrahl kann das Aktivmaterial an definierten Stellen wieder abgetragen und somit die Trägerfolie freigelegt werden. Diese Technologie bietet eine hohe Flexibilität bezüglich der Positionierung der Stromfahnen der Zelle.
- Laserschnitt: Anstelle eines konventionellen Stanzwerkzeuges können die Elektroden auch durch einen Laser ausgeschnitten werden.

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Schnittkantengeometrie (z.B. Verschmierung des Aktivmaterials über die Schnittkanten)
- Thermische und mechanische Belastung bei dem Trennvorgang

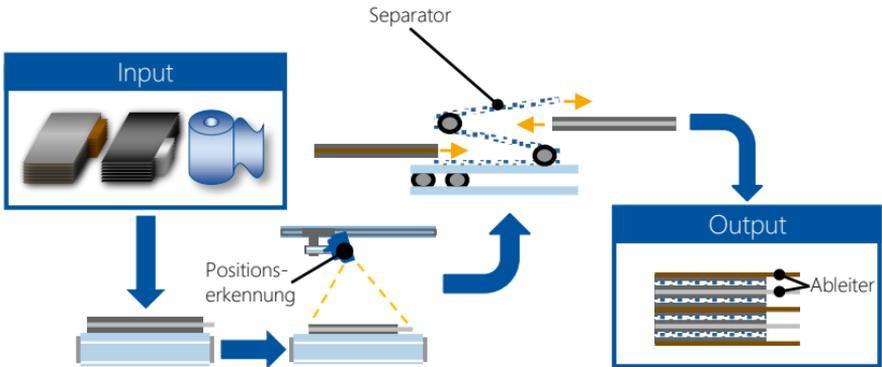
Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 5-10 Mio. €
(Vereinzeln Pouch)



Stapeln

Zell-Assemblierung



Elektrodenfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Bei dem Stapelvorgang werden die vereinzelt Elektroden sheets in einem sich wiederholenden Zyklus aus Anode, Separator, Kathode, Separator, usw. gestapelt.
- Es existieren unterschiedlichste Stapeltechnologien, die üblicherweise herstellerspezifisch patentiert sind.
- Eine klassische Variante des Stapelns ist das sogenannte Z-Folding.
- Dabei werden die Anoden- und Kathodensheets abwechselnd von links und rechts in den z-förmig gefalteten Separator eingelegt. Der Separator liegt dabei als Endlosband vor und wird nach dem Stapelprozess abgeschnitten.
- Der Zellstapel wird abschließend mit Klebestreifen fixiert.

Zusätzliche Informationen

- Die exakte Positionierung der einzelnen Sheets stellt das zentrale Qualitätskriterium dar.
- Die Sheets werden dabei in der Regel durch Vakuumgreifer transportiert und positioniert.
- Je nach Zellspezifikation kann ein Zellstapel aus bis zu 120 Zellen bestehen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Z-Folding: einzelnen Anoden- und Kathodenblätter werden seitlich in die Z-förmig gefaltete Separatorbahn gelegt
- Single-Sheet-Stacking: Separator liegt für Stapelbildung als Sheet vor
- Stapelgenauigkeit: $\pm 200 \mu\text{m} - 300 \mu\text{m}$
- Z-Folding und Single-Sheet-Stacking : Taktzeiten von 1 s/Blatt

Technologiealternativen [Auszug]

- Laminationsverfahren: Die einzelnen Elektroden- und Separatorsheets werden in einem kontinuierlichen Prozess aufeinander laminiert und in der Regel anschließend durch einen Wärmeeintrag verpresst.
- Pocket-Stacking: Die Kathodensheets werden in eine Separatortasche eingebracht. Anschließend werden Kathoden- und Anodensheets abwechselnd gestapelt.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Positionserkennung und -ausrichtung der unterschiedlich großen Sheets mit einem Vakuumgreifer
- Mechanische Separatorvorspannung

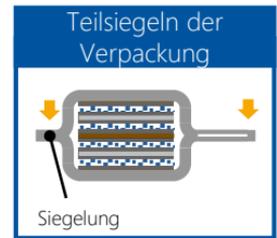
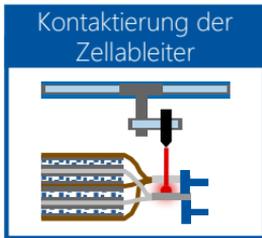
Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Positioniergenauigkeit der Anoden- und Kathodensheets
- Beschädigungsfreie Elektrodenoberflächen und -kanten
- Vermeidung elektrostatischer Aufladung

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 18-27 Mio. €
(Stapeln Pouch)

Verpackung Zell-Assemblierung



Elektrodenfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Für die Verpackung der Pouchzelle erfolgt zunächst die Kontaktierung der Ableiterfolien (Anode - Kupfer und Kathode - Aluminium) mit den Kontaktterminals durch einen Ultraschall- oder Laserschweißprozess.
- Anschließend wird der Zellstapel in der Pouchfolie positioniert. Dazu wird die Pouchfolie zunächst tiefgezogen.
- Die Pouchzelle wird in der Regel über ein Impuls- oder Kontaktsiegeln an drei Seiten gasdicht verschlossen.
- Eine Seite der Zelle (häufig die Unterseite der Zelle) wird noch nicht final versiegelt, um die Zelle im nächsten Prozessschritt mit Elektrolyt befüllen zu können.

Zusätzliche Informationen

- Die Verpackungsmaterialien sind i.d.R. als Zukaufteile anzusehen.
- Das Tiefziehen der Pouchfolie wird entweder direkt in der Produktionslinie oder in einem separaten Prozess durchgeführt.

Prozessparameter & -anforderungen

- Tiefziehen: bis zu 6 mm
- Ultraschallschweißen mit ca. 15 kHz – 40 kHz
- Verpackungsmaterial:
Aluminiumverbundfolie
(Polyamid/Aluminium/Polypropylen)
- Faustformel: „1 mm Siegelnahtbreite entspricht ungefähr einem Jahr kalendarischer Lebensdauer“

Technologiealternativen [Auszug]

- Bookfolding-Verfahren: Für das Einbringen in die Verpackung kann anstelle von zwei einzelnen Pouchfolien auch eine Folie mit zwei tiefgezogenen Hälften verwendet werden. Nachdem das Stack eingebracht wurde, wird diese Folie dann wie ein Buch zusammengeklappt und anschließend versiegelt.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Reduktion der thermischen Belastung bei der Kontaktierung und bei dem Siegelprozess
- Siegelnahtbreite
- Siegeltemperatur und -druck

Qualitätsmerkmale [Auszug]

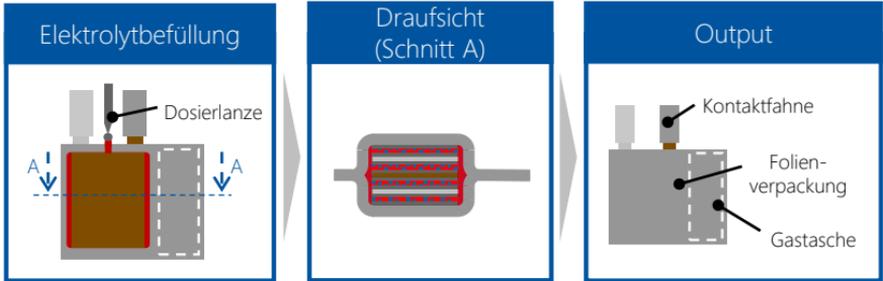
- Geringer Übergangswiderstand sowie geringe mechanische und thermische Belastung bei dem Schweißvorgang
- Dauerfestigkeit und Dichtigkeit der Verschlussnähte

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 16-23 Mio. €
(Verpackung Pouch)

Elektrolytbefüllung

Zell-Assemblierung



Elektrodenfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Die Elektrolytbefüllung erfolgt nachdem der Zellstapel in die Verpackung eingebracht wurde.
- Während der Elektrolytbefüllung ist zwischen den Teilprozessen „Befüllen“ und „Benetzen“ zu unterscheiden.
- Der Elektrolyt wird über eine hochgenaue Dosierlanze unter Vakuum in die Zelle geführt (Befüllen).
- Durch die Beaufschlagung der Zelle mit einem Druckprofil (Zuführung von Inertgas und/oder Erzeugung eines Vakuums im Wechselbetrieb) wird die Kapillarwirkung in der Zelle aktiviert (Benetzen).
- Die Evakuierung und Teil-Befüllung werden je nach Hersteller und Zelltyp mehrfach wiederholt.
- Abschließend wird die Pouchfolie unter Vakuum versiegelt.

Zusätzliche Informationen

- Der Elektrolyt (z.B. LiPF₆) ist als Zukaufstoff anzusehen und stellt durch seine Klassifizierung als Gefahrstoff hohe Anforderungen an die Prozessumgebung (Brandschutz, Absaugung, etc.).

Prozessparameter & -anforderungen

- Geometrie der Dosierlanze
- Arbeitsdruck: ca. 0,01 mbar
- Gleichmäßige, kontinuierliche oder zyklische Befüllung zur Gewährleistung einer homogenen Elektrolytverteilung
- Besonders trockene Umgebung notwendig
- Gravimetrische Kontrolle der Elektrolytmenge

Technologiealternativen [Auszug]

- Keine Alternativen in der Serienfertigung.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Dosierverfahren (z.B. Dosierpumpe)
- Geometrie und Verschlussystem der Dosierlanze
- Transportsystem für den Elektrolyten

Qualitätsmerkmale [Auszug]

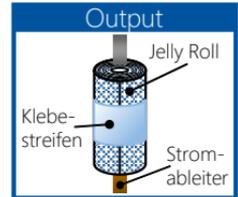
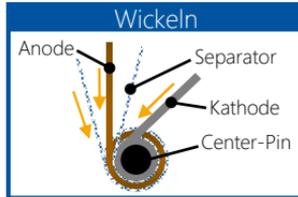
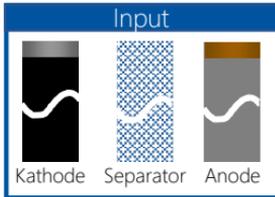
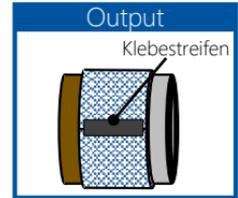
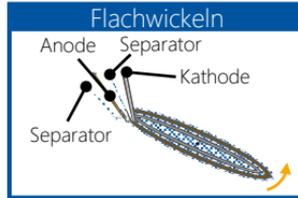
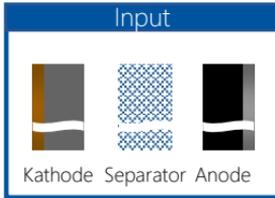
- Dosier- und Verteilgenauigkeit des Elektrolyten in der Zelle
- Keine Elektrolytrückstände in der Siegelnaht
- Dichtigkeit der versiegelten Zelle

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 6-12 Mio. €
(EL-Befüllung Pouch)

Wickeln

Zell-Assemblierung



Elektrodenfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Das Wickeln ist für die Herstellung von Prismatischen Zellen und Rundzellen notwendig und findet nach dem Vakuumtrocknen der Tochtercoils statt.
- Die Elektrodenbahnen und zwei Separatorbahnen werden um einen Wickeldorn (Prismatische Zelle) oder einen Center-Pin (Rundzelle) gewickelt. Dabei ist die Bahnreihenfolge analog zum Stapelprozess.
- Das gewickelte Erzeugnis wird als Jelly-Roll bezeichnet.
- Die Positionierung der einzelnen Bahnen der Jelly-Roll wird abschließend durch einen Klebestreifen gesichert.

Zusätzliche Informationen

- Die exakte Positionierung und Ausrichtung der Elektrodenbahnen und Separatorbahnen stellt das zentrale Qualitätskriterium dar.
- Die Prozesszeiten sind für den Wickelprozess deutlich geringer als für den zuvor beschriebenen Stapelprozess.

Prozessparameter & -anforderungen

- Maschinendurchsatz: bis zu 30 Zellen/Minute (Rundzelle)
- Integration des Ableiterschweißvorganges in der Wickelmaschine für Rundzellen
- Maschinendurchsatz bis zu 6 Zellen/Minute (Prismatische Zelle)

Technologiealternativen [Auszug]

- Keine Alternativen in der Serienfertigung.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Wickelgeschwindigkeit
- Bahnspannung
- Bahnkantensteuerung
- Vermeidung elektrostatischer Aufladung

Qualitätsmerkmale [Auszug]

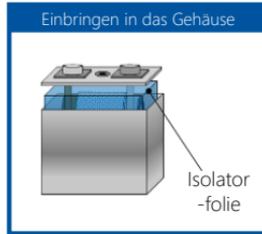
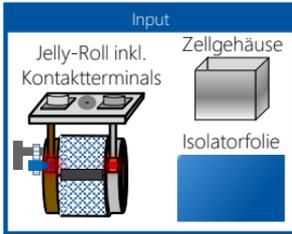
- Positioniergenauigkeit der Anoden- und Kathodenbahnen
- Beschädigungsfreie Elektrodenoberflächen und -kanten

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 15-35 Mio. €
(Wickeln)



Verpackung Zell-Assemblierung



Elektrodenfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Die Jelly-Roll wird im Gegensatz zum Zellstapel bei der Pouchzelle in ein formstabiles metallisches Gehäuse eingebracht.
- Bei der Prismatischen Zelle werden die Ränder der Jelly-Roll zusammengepresst, fixiert und mit den am Deckel der Batterie befestigten Kontaktterminals durch Ultraschall verschweißt.
- Eine Isolationsfolie schützt die Jelly-Roll bei dem Einbringen in das prismatische Gehäuse.
- Das Gehäuse wird in der Regel durch einen Laserschweißprozess versiegelt.
- Bei der Rundzelle werden in einem ersten Prozessschritt ein Bodenisolator sowie die Jelly-Roll in das zylindrische Gehäuse eingebracht.
- Anschließend wird in der Regel der Stromableiter der Anode an den Gehäuseboden und der Stromableiter der Kathode an den Deckel angeschweißt.
- Abschließend wird ein Isolationsring zwischen Jelly-Roll und Deckel eingelegt.

Zusätzliche Informationen

- Die Zellgehäuse und die Isolationsmaterialien sind i.d.R. als Zukaufteile anzusehen.

Prozessparameter & -anforderungen

- Frequenz Ultraschallschweißen: ca. 15 kHz – 40 kHz
- Flexible Strahlführung und -formung bei dem Laserschweißen des Deckels der Prismatischen Zelle
- Verbindung Anode-Gehäuseboden: Widerstandsschweißen
Verbindung Kathode-Deckel: Laserschweißen

Technologiealternativen [Auszug]

- Keine Alternativen in der Serienfertigung.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Reduktion der thermischen Belastung bei den Schweißvorgängen
- Reinheit des metallischen Gehäuses
- Handling der Jelly-Roll

Qualitätsmerkmale [Auszug]

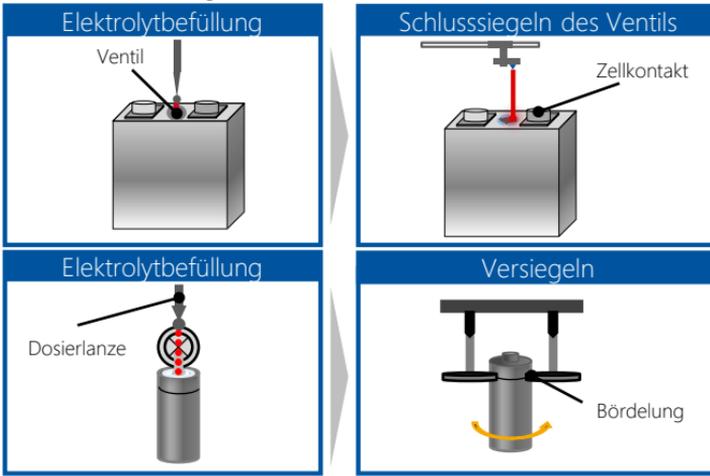
- Geringer Übergangswiderstand sowie geringe mechanische und thermische Belastung bei dem Schweißvorgang
- Isolation gegen das metallische Gehäuse

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 10-20 Mio. €
(Verpackung Prism. / Rund)

Elektrolytbefüllung

Zell-Assemblierung



Elektrodenfertigung

Zell-Finishing

Produktionsablauf

- Die Elektrolytbefüllung erfolgt nachdem die Jelly-Roll in das Gehäuse eingebracht ist.
- Während der Elektrolytbefüllung ist zwischen den Teilprozessen „Befüllen“ und „Benetzen“ zu unterscheiden.
- Der Elektrolyt wird über eine hochgenaue Dosierlanze unter Vakuum in die Zelle geführt (Befüllen).
- Durch die Beaufschlagung der Zelle mit einem Druckprofil (Zuführung von Inertgas und/oder Erzeugung eines Vakuums im Wechselbetrieb) wird die Kapillarwirkung in der Zelle aktiviert (Benetzen).
- Die Evakuierung und Teil-Befüllung werden je nach Hersteller und Zelltyp mehrfach wiederholt.
- Das Siegeln der Zellen erfolgt mittels verschweißtem Dorneinsatz (Prismatische Zelle) bzw. mittels Bördeln oder Krimpen (Rundzelle).

Zusätzliche Informationen

- Der Elektrolyt (z.B.: LiPF₆) ist als Zukaufstoff anzusehen und stellt durch seine Klassifizierung als Gefahrstoff hohe Anforderungen an die Prozessumgebung (Brandschutz, Absaugung, etc.).

Prozessparameter & -anforderungen

- Arbeitsdruck: ca. 0,01 mbar
- Gleichmäßig kontinuierliche oder zyklische Befüllung zur Gewährleistung einer homogenen Elektrolytverteilung
- Besonders trockene Umgebung notwendig
- Gravimetrische Kontrolle der Elektrolytmenge

Technologiealternativen [Auszug]

- Keine Alternativen in der Serienfertigung.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Dosierverfahren (z.B. Dosierpumpe)
- Geometrie und Verschlussystem der Dosierlanze
- Transportsystem für den Elektrolyten

Qualitätsmerkmale [Auszug]

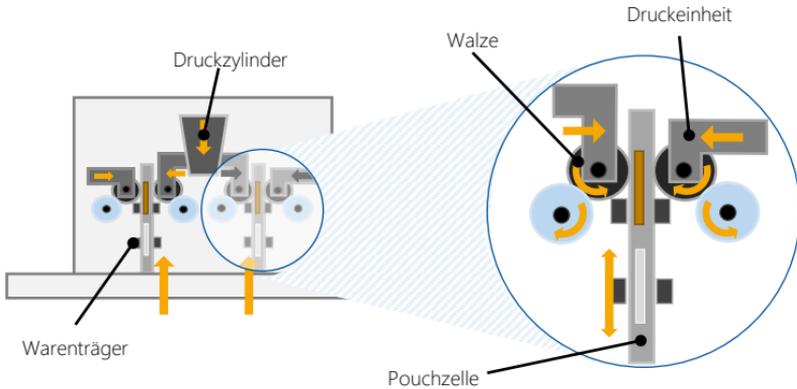
- Dosier- und Verteilgenauigkeit des Elektrolyten in der Zelle
- Dichtigkeit der versiegelten Zelle
- Elektrolytmenge

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 12-18 Mio. €
(Elektrolytbefüllung Prism. / Rund)

Roll Pressing

Zell-Finishing



Elektrodenfertigung

Zell-Assemblierung

Produktionsablauf

- Nach der Elektrolytbefüllung kann für die Pouchzelle ein optionaler Roll Pressing Prozess stattfinden.
- Die Lithium-Ionen-Pouchzelle wird dazu mit Hilfe eines Greifers in einen speziellen Warenträger eingespannt.
- Ein Servomotor führt die Zelle durch zwei Rollen, die einen definierten Druck aufbringen.
- Die Rollen werden währenddessen durch Reinigungsrollen gereinigt.
- Durch das Roll Pressing wird eine optimierte Verteilung und Absorption des Elektrolyten unter definiertem Druck sichergestellt.
- Dieser Schritt dient der Vorbereitung für die anschließende Formierung, da elektrochemisch inaktive Bereiche durch die Druckbeaufschlagung vermieden werden.

Zusätzliche Informationen

- Durch das Roll Pressing wird gewährleistet, dass die maximale Kapazität der Zellen erreicht und die Ausschussrate reduziert wird.

Prozessparameter & -anforderungen

- Definierte Druckbeaufschlagung
- Möglichst homogene Verteilung des Druckes auf der gesamten Zellfläche
- Prozesszeiten zwischen 2 und 5 Sekunden pro Zelle
- Gewährleistung der idealen Überdeckung der einzelnen Elektroden sheets

Technologiealternativen [Auszug]

- Für Prismatische Zellen und Rundzellen wird je nach Hersteller ein Rütteltisch für die Sicherstellung der optimalen Elektrolytbenetzung verwendet.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Druckverteilung
- Rollengeometrie
- Prozessführung (Anzahl der Durchgänge, etc.)

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Optimale Bildung der SEI-Schicht bei der anschließenden Formierung
- Elektrolytverteilung innerhalb der Zelle
- Kapazität der Zelle nach der Formierung

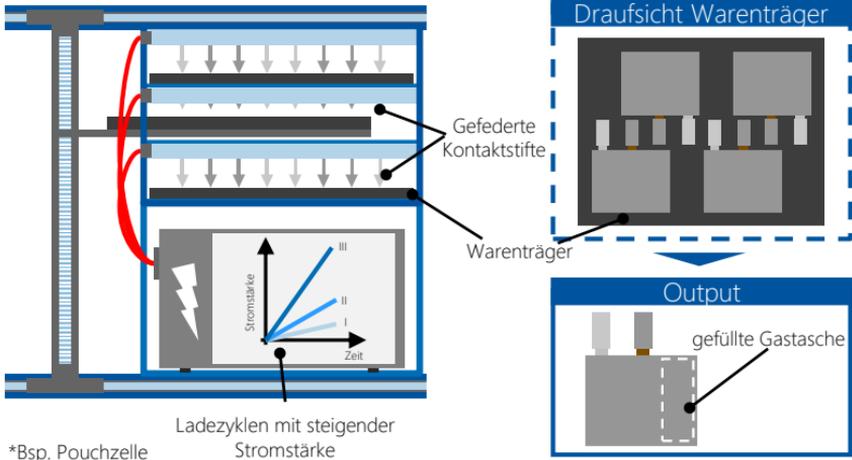
Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 4-8 Mio. €
(Roll Pressing Pouch)



Formierung

Zell-Finishing



Elektrodenfertigung

Zell-Assemblierung

Produktionsablauf

- Die Formierung bezeichnet die ersten Lade- und Entladevorgänge der Batteriezelle.
- Zur Formierung werden die Zellen in Spezialwarenlägern in Formationsregale geführt und durch Federkontaktstifte kontaktiert.
- Anschließend werden die Zellen nach genau definierten Strom- und Spannungsverläufen geladen bzw. entladen.
- Während der Formierung lagern sich Lithium-Ionen in die Kristallstruktur des Graphits auf der Anodenseite ein. Hierbei wird die Solid Elektrolyte Interface (SEI), die eine Grenzschicht zwischen dem Elektrolyten und der Elektrode darstellt, gebildet.

Zusätzliche Informationen

- Die Parameter während der Formierung sind je nach Zellhersteller unterschiedlich und beeinflussen in einem hohen Maße die Zellperformance. Sie hängen von dem Zellkonzept sowie der Zellchemie ab und stellen das Kernwissen eines Zellherstellers dar.
- Teilweise werden v.a. Pouchzellen während der Formierung durch spezielle Warenträger mit Druck beaufschlagt.

Prozessparameter & -anforderungen

- Erster Ladevorgang: ca. 0,1 C – 0,5 C; State of Charge (SOC) ca. 20 % – 80 %
- Sukzessive Steigerung der C-Raten mit jedem Lade- und Entladezyklus
- Dauer Formierungsprozess: bis zu 24 h
- Geringe Übergangswiderstände an den Federkontaktstiften

Technologiealternativen [Auszug]

- Es existieren unterschiedlichste Prozeduren für die Formierung je nach Zellhersteller und Zellchemie.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Lage der Zellen
- Kontaktierungsart
- Prozesstemperatur
- Druckbeaufschlagung, v.a. bei Pouchzellen

Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Ausbildung der SEI Schicht
- Zeitliche Stabilität der SEI Schicht
- Innenwiderstand der Zelle

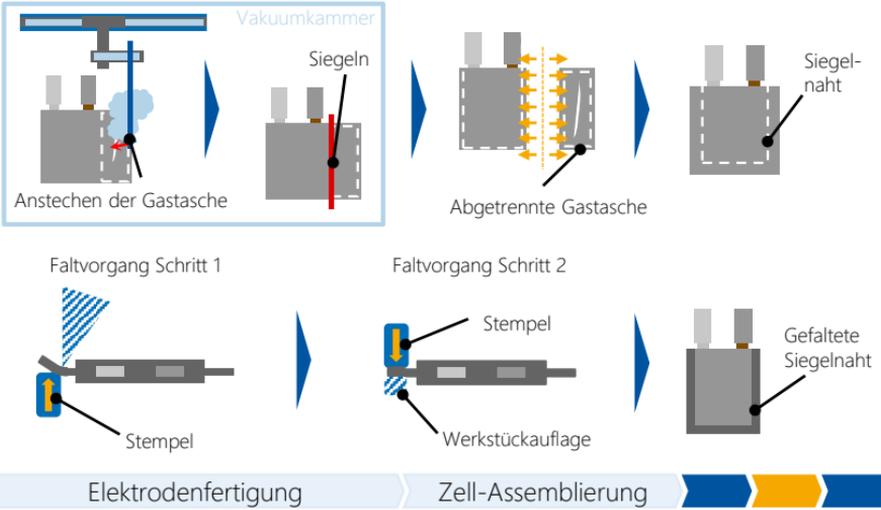
Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 70-90 Mio. €
(Formierung)

* Studie des PEM der RWTH Aachen: ca. 45.000.000 Pouchzellen/a, Zellkapazität: 25 Ah, 4 GWh/a



Entgasen Zell-Finishing



Produktionsablauf

- Bei vielen Pouchzellen (v.a. bei größeren Zellen) kommt es während des ersten Ladevorgangs zu einer starken Gasentwicklung.
- Druckbeaufschlagte Warenträger pressen dieses Gas aus der Zelle in einen Totraum (auch Gastasche genannt).
- Beim Entgasen wird die Gastasche in einer Vakuumkammer angestochen und die austretenden Gase werden abgesaugt. Anschließend wird der Bereich zwischen der Gastasche und der Zelle final und unter Vakuum versiegelt.
- Die Gastasche wird abgetrennt und als Sondermüll entsorgt.
- Ein abschließendes Falten und ggf. Verkleben der Siegelränder zur Reduzierung der Außenabmaße der Pouchzelle kann optional durchgeführt werden.

Zusätzliche Informationen

- Die abgesaugten Gase müssen je nach Arbeitsschutz- und Umweltschutzregularien nachbehandelt werden (z.B. RTO), bevor sie dem Abluftsystem zugeführt werden.

Prozessparameter & -anforderungen

- Falten und Kleben der Siegelnähte zur Erhöhung der volumetrischen Energiedichte
- Beschädigungsfreies Falten der Ränder
- Nahtbreiten von bis zu 1 cm
- Abdichten gegen Feuchtigkeit und Sauerstoff

Technologiealternativen [Auszug]

- Vor allem bei kleineren Zellen mit geringerer Gasentwicklung und je nach Hersteller wird die Gastasche nach dem Entgasen nicht abgetrennt.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Pressung der Zellen zur Entgasung
- Siegel- und Faltechnik
- Absaugen der Gase unter Vakuum und in trockener Atmosphäre

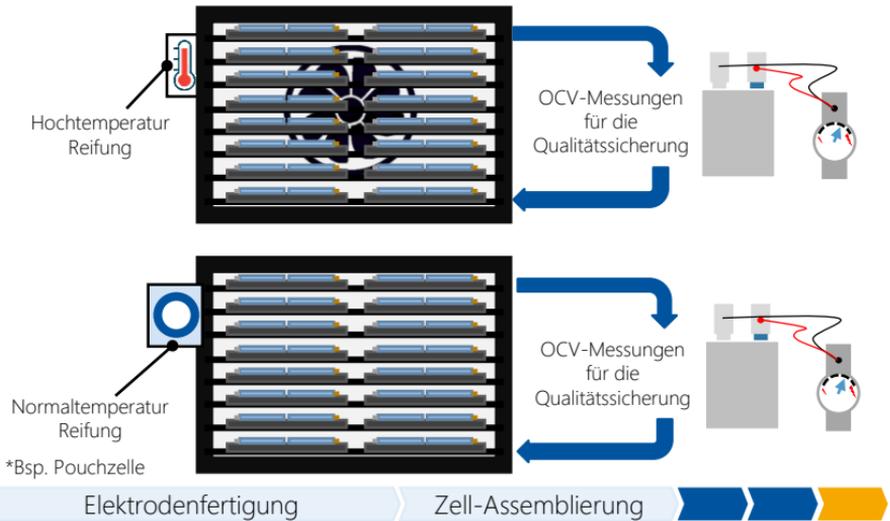
Qualitätsmerkmale [Auszug]

- Restgas im Zellinneren
- Beschädigungsfreies Zellhandling (unterschiedliche Ausprägungen der Gasblasen)

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 10-15 Mio. €
(Entgasen Pouch)

Reifung Zell-Finishing



Produktionsablauf

- Die Reifung stellt den finalen Schritt der Zellfertigung dar und dient der Qualitätssicherung.
- Während der Reifung werden die Zelleigenschaften und die Zellperformance durch regelmäßige Messung der Leerlaufspannung der Zelle über einen Zeitraum von bis zu drei Wochen überwacht.
- Es wird zwischen Hochtemperatur- (HT) und Normaltemperatur- (NT) Reifung unterschieden. Die Zellen durchlaufen dabei in der Regel zuerst eine HT-Reifung und anschließend eine NT-Reifung.
- Die Zellen werden in sogenannten Reiferegalen und/oder -türmen gelagert.
- Keine signifikante Änderung der Zelleigenschaften über den gesamten Zeitraum bedeutet, dass die Zelle in Ordnung ist und ausgeliefert werden kann.

Zusätzliche Informationen

- Im Gegensatz zu der Formierung werden die Pouchzellen in diesem Prozessschritt nicht mehr mit Druck beaufschlagt.
- Die Dauer des Reifeprozesses hängt stark vom jeweiligen Zellhersteller und der verwendeten Zellchemie ab.

Prozessparameter & -anforderungen

- Ladezustand der Zelle zu Beginn der Reifung: 80 % – 100 % SOC
- Reifedauer: bis zu 3 Wochen
- Normaltemperatur ca. 22°C, Hochtemperatur ca. 30°C – 50°C

Technologiealternativen [Auszug]

- Es existieren unterschiedlichste Prozeduren für die Abfolge und Dauer von HT- und NT-Reifung je nach Zellhersteller und Zellchemie.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Lage der Zellen
- Packungsdichte der Zellwareenträger
- Umgebungstemperatur

Qualitätsmerkmale [Auszug]

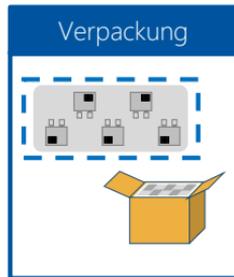
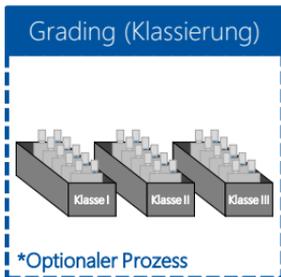
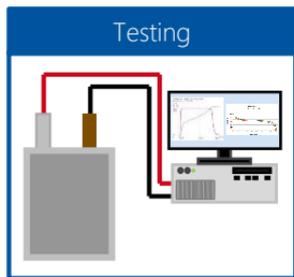
- Kapazität
- Innenwiderstand
- Selbstentladerate

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 5-15 Mio. €
(Reifung)

EOL-Testing

Zell-Finishing



*Bsp. Pouchzelle

Elektrodenfertigung

Zell-Assemblierung

Produktionsablauf

- Bevor die Zellen das Werk verlassen, werden sie in einem EOL-Prüfstand getestet.
- Die Zellen werden den Warenträgern in den Reiferegalen entnommen und der Prüfstation zugeführt. Hier werden sie auf den Versand-Ladezustand entladen (Kapazitätsmessung).
- Je nach Hersteller werden anschließend Pulstests, Innenwiderstandsmessungen (DC), optische Inspektionen, OCV-Tests und Dichtheitstests durchgeführt.
- Im Anschluss an die Prüfung werden die Zellen bei vielen Zellherstellern den Leistungsdaten entsprechend sortiert (Grading).
- Wenn die Prüfungen abgeschlossen sind und alle Tests erfolgreich bestanden wurden, können die Zellen verpackt und versandt werden.

Zusätzliche Informationen

- Für den Transport werden die Zellen in der Regel mit einer Kunststoffabdeckung versehen und in einem Pappkarton gestapelt.

Prozessparameter & -anforderungen

- Ladezustand der Zelle für den Versand:
5 % – 20 % SOC
- Zulässige Verlustrate: < 5 mV pro Woche
- Erhöhte Verlustrate: > 5mV pro Woche kann
z.B. auf zellinterne Kurzschlüsse hindeuten

Technologiealternativen [Auszug]

- Je nach Zellhersteller existieren unterschiedliche Testabfolgen und Testdauern.

Qualitätseinflüsse [Auszug]

- Zellhandling

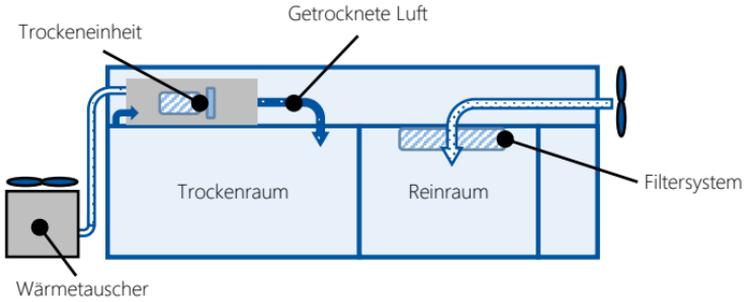
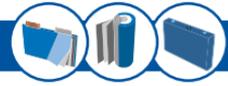
Qualitätsmerkmale

- Geringe Selbstentladung
- Geringer Innenwiderstand
- Konstante Kapazität

Fertigungskosten* [Auszug]

Invest für Maschinen und Anlagen: 5-8 Mio. €
(EOL-Testing)

Produktionsumgebung



| | Reinraum- klasse | Trockenraum (Taupunkt) | Temperatur | Anmerkungen |
|----------------------|---------------------|------------------------------------|--------------------|--|
| Mischen | ISO 8 | / | | |
| Beschichten | ISO 7 | Semi-Dry (5°C bis -5°C) | 22 ± 2 °C | Die Elektroden- fertigung findet unter Reinraum- bedingungen statt, da Fremdpartikel in der Beschichtung im späteren Prozess nicht mehr durch Reinigungs- methoden (z.B. Absaugen) zu entfernen sind. |
| Trocknen | | | | |
| Kalandern | | | | |
| Slitting | ISO 7 - ISO 8 | | | |
| Vakuum- trocknen | | Trocken (0°C bis -30°C) | | |
| Vereinzeln | | Trocken (-25°C bis -35°C) | | Die Zell- Assemblierung muss unter trockenen Bedingungen durchgeführt werden, da Wasser innerhalb der Zelle zu starken Qualitätseinbußen (Lebensdauer) und zu einem Sicherheitsrisiko (Bildung von Flusssäure) führt. |
| Stapeln / Wickeln | mind. | Trocken (-40°C bis -50°C) | 22 ± 2 °C | |
| Verpacken | ISO 7 | | | |
| EL- Befüllung | | Extra Trocken (-50°C bis -70°C) | | |
| Formierung | | | 22 ± 3 °C | Das Zell-Finishing findet in normaler Umgebung statt. Da die Zelle bereits verschlossen ist und die Entgasung in einer Vakuumkammer stattfindet, bestehen geringere Anforderungen an die Partikelumgebung und an die Feuchtigkeit. |
| Entgasen | | | 30 °C bis 50 °C | |
| HT Reifung | / | / | | |
| NT Reifung | | | 22 ± 3 °C | |
| EOL Testing | | | | |