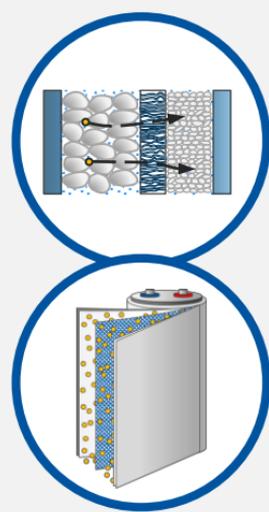
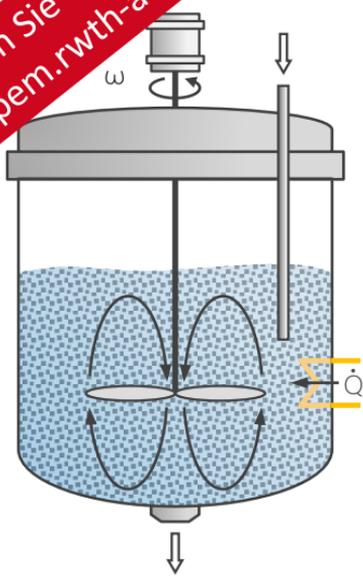


Auch als kostenlose
Faltbroschüre erhältlich
Schreiben Sie eine Mail an:
info@pem.rwth-aachen.de

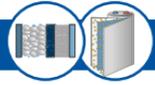


Komponentenherstellung einer Lithium-Ionen- Batteriezelle



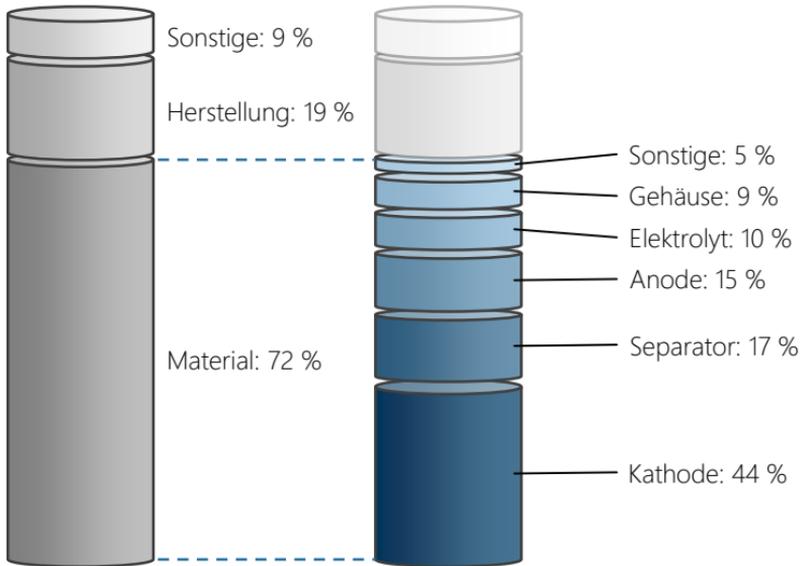
In Kooperation mit:





Gesamtkosten

Materialkosten



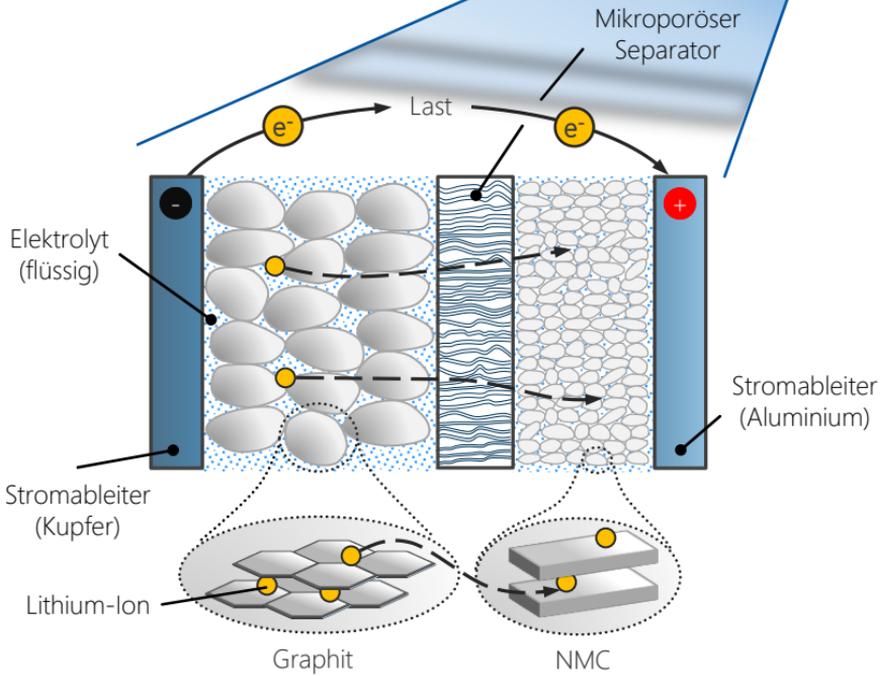
Kosten

- Die **Batterie** ist mit bis zu 50 % der Gesamtkosten die teuerste Komponente eines Elektrofahrzeugs. Deshalb wird der Erfolg der Elektromobilität wesentlich durch den Preis der Batterie bestimmt.
- Eine Möglichkeit die Batterie leistungsstärker, energiereicher und damit durchsetzungsfähiger zu gestalten, besteht in der Verwendung qualitativ **hochwertiger Komponentenmaterialien**.
- Bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen nehmen die **Materialkosten** den Hauptanteil der Batterie-Gesamtkosten ein.
- Mit 44 % der Materialkosten ist das **Kathodenmaterial** die teuerste Komponente der Batteriezelle.
- Auch der **Separator** hat mit einem Materialkostenanteil von 17 % einen maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtkosten.

Der Fokus der nachfolgenden Seiten liegt auf den Herstellungsprozessen der Aktivmaterialien und des Elektrolyten. Anschließend werden die Elektrodenfolien-, der Separator- und die Zellgehäusefertigung beschrieben.

Aktive Materialien

Kapitelübersicht



Kathode

Anode

Elektrolyt

Die Batteriezelle

- Eine Batteriezelle besteht aus einer **positiv** und einer **negativ** geladenen **Elektrode**, einem Separator sowie einer **Elektrolytlösung**.
- Die **positive Elektrode (Kathode)** setzt sich aus einer 15 – 25 μm dicken Aluminiumfolie als Stromableiter, dem darüberliegenden Aktivmaterial (z.B. Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid - NMC) und Additiven zusammen.
- Die **negative Elektrode (Anode)** besteht aus einer 8 – 18 μm dicken Kupferfolie, die mit Aktivmaterial (Graphit) und Additiven beschichtet ist.
- Beide Elektroden sind durch den **Separator** elektrisch voneinander isoliert.
- Die Batteriezelle wird nach der Zellassemblierung mit dem **Elektrolyten** befüllt. Eine gute Elektrolytbenetzung der Aktivmaterialien und des Separators ist besonders wichtig, um einen hohen Ionenfluss zu gewährleisten.

Aufgaben des Aktivmaterials

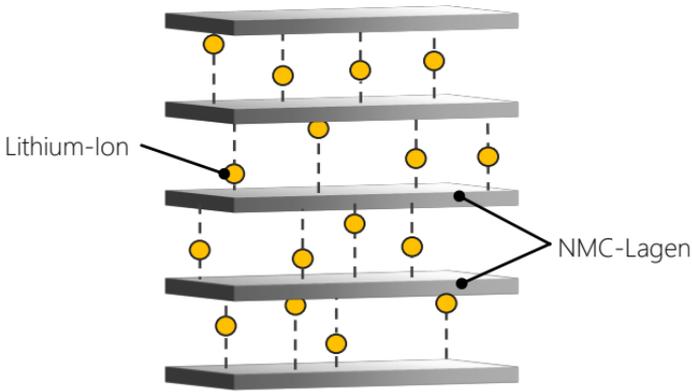
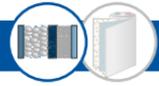
- Einlagerung der Li-Ionen
- Aufnahme der Elektrolytlösung

Aufgaben des Elektrolyten

- Li-Ionen-Leitfähigkeit

Kathodenmaterial

NMC-Herstellung – Gesamtübersicht



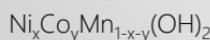
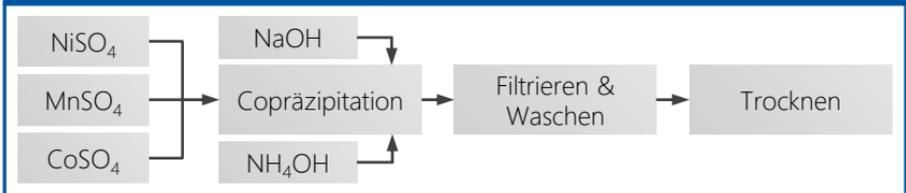
Präkursorherstellung

Festkörpersynthese

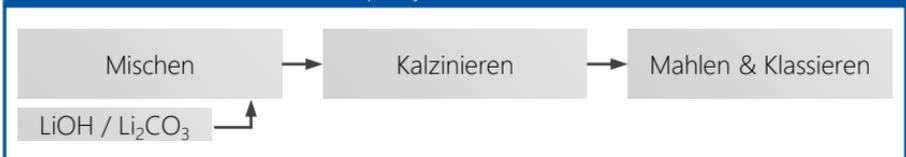
Nachbehandlung

Die obere Abbildung zeigt das schichtweise angeordnete NMC mit eingelagerten Lithium-Ionen. Im Folgenden werden die Produktionsschritte zur Herstellung des **Nickel-Mangan-Kobalt-Kathodenmaterials** veranschaulicht. NMC wird hauptsächlich industriell in einem zweistufigen Verfahren hergestellt, welches sich in die drei Teilprozesse Präkursorherstellung, Festkörpersynthese und Nachbehandlung unterteilt. Der Präkursor kann entweder über die Carbonat- oder über die Hydroxidroute synthetisiert werden. Aufgrund der höheren industriellen Relevanz des Hydroxidpräkursors, wird im Folgenden beispielhaft auf diesen eingegangen.

Herstellung des Hydroxidpräkursors

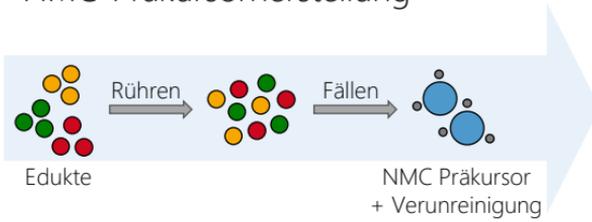
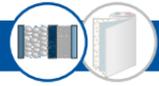


Festkörpersynthese zu Li-NMC

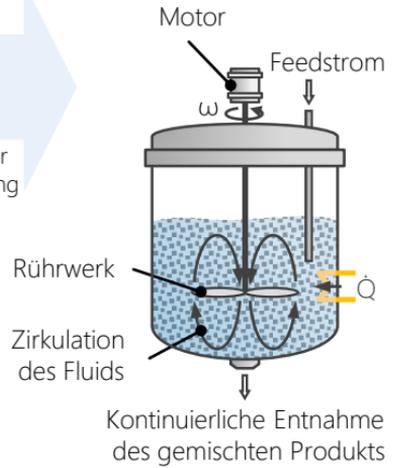


Kathodenmaterial

NMC-Präkursorherstellung



Der Prozess kann entweder **kontinuierlich** oder im **Chargenbetrieb** gefahren werden. Besonders die gleichbleibende Produktqualität spricht, trotz der komplexen Prozessführung, für einen kontinuierlich arbeitenden Reaktor (**Continuously Stirred Tank Reactor**).



Copräzipitation

Nachbearbeitung

Prozessschritte

- Bei der **Copräzipitation** liegen die drei Edukte Nickel-, Mangan-, und Kobaltsulfat in **separaten Lösungen** vor.
- Die Ausgangsstoffe müssen eine hohe **Reinheit** aufweisen, da Verunreinigungen elektrochemisch inerte Phasen bilden können und den Transport der Lithium-Ionen stören. So reduziert sich die **reversible Kapazität** der Batteriezelle.
- Die Lösungen werden entsprechend dem gewünschten **Stoffmengenverhältnis** von Nickel, Mangan und Kobalt zusammengeführt.
- Im Reaktor findet unter schnellem Rühren eine **Fällungsreaktion** statt. Es besteht die Gefahr, dass die Metallhydroxide unabhängig voneinander ausfallen.

Prozessparameter

- Reinheit der Edukte
- pH-Wert: 11 – 12
- Rührgeschwindigkeit: 1.000 rpm
- Temperatur: 35 – 80°C

Qualitätsmerkmale

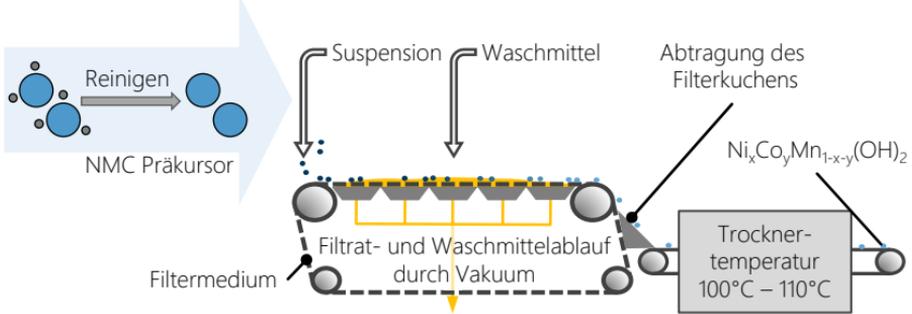
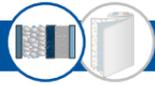
- Homogenität
- Agglomeratbildung
- Reinheit
- Gaseinschlüsse
- Viskosität
- pH-Wert

Mess- und Prüftechnik

- Restfeuchtwage, Laserstreuung, Röntgendiffraktometrie (XRD), opt. Emissionsspektrometrie mitt. induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Kathodenmaterial

NMC-Präkursorherstellung



Nach der Synthese im Reaktor liegt das NMC als **heterogenes Stoffgemisch** vor. Um den Präkursor nach dem Verfahrensprinzip der Festkörperreaktion weiterverarbeiten zu können, muss der Stoff **filtriert, gewaschen** und **getrocknet** werden.

Copräzipitation

Nachbearbeitung

Prozessschritte

- Die Suspension aus der Copräzipitation wird auf einen **Bandfilter** gegeben, um den NMC-Präkursor aus der Suspension abzutrennen.
- Der auf dem Bandfilter verbleibende NMC-Präkursor (Filterkuchen) ist mit Lauge aus der Copräzipitation verunreinigt.
- Um den Filterkuchen zu reinigen und die verbleibende Lauge zu entfernen, wird das **Waschmittel** von oben auf den Filterkuchen gegeben und mit der Suspensionsflüssigkeit unter dem Bandfilter wieder abgesaugt.
- Beim Trockenvorgang wird der Filterkuchen bei einer Temperatur von ca. 110 °C kontinuierlich getrocknet.
- Alternativ zu der Abtrennung mithilfe eines Bandfilters und dem anschließenden Trockner kann ein **Sprühtrockner** verwendet werden, der die Suspension zunächst zerstäubt und sie anschließend in einem Heißgasstrom trocknet.

Prozessparameter

- Temperatur beim Trocknen: 100 – 110 °C
- Porenweite Filter
- Waschmittel

Qualitätsmerkmale

- Restfeuchte
- Partikelmorphologie
- Reinheit

Mess- und Prüftechnik

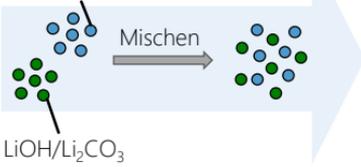
- Restfeuchtewaage, Rasterelektronenmikroskopie (REM), opt. Emissionsspektrometrie mitt. induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Kathodenmaterial

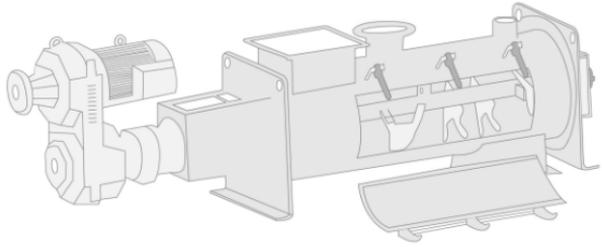
NMC-Festkörpersynthese



NMC Präkursor



Pflugscharmischer



Mischen

Kalzinieren

Mahlen

Prozessschritte

- Die beiden möglichen Ausgangsstoffe für diesen Prozessschritt, **Lithium-Hydroxid** und **Lithium-Carbonat**, sind als Feststoff gut verfügbar, weshalb sich das Trockenmischverfahren mittels Intensivmischer anbietet.
- Bei dem Trockenmischverfahren spielt eine annähernd vollständige **Desagglomeration** der eingesetzten Rohstoffe eine wichtige Rolle. Auch eine **definierte Feinheit** bzw. **große spezifische Oberfläche** der Edukte muss durch deren Herstellungsprozesse gewährleistet sein, um eine hohe Reaktionsfähigkeit der späteren Batteriezelle zu erreichen.
- Als **Intensivmischer** werden häufig Pflugscharmischer mit Messerköpfen eingesetzt. Diese weisen **Maschinenauskleidungen aus Keramik, Kunststoff oder Hartmetallen** auf, um eisenfreie Synthesebedingungen zu gewährleisten.
- Ein Teil des Lithiums verdampft in den nächsten Schritten durch Temperaturbehandlung und muss durch einen leichten **Lithiumüberschuss** im Mischprozess von 5 – 10 % kompensiert werden.

Prozessparameter

- Stöchiometrie Li zu NMC:
1,05 – 1,10
- Partikelgröße: wenige Mikrometer
- Rührgeschwindigkeit
- Eisenfreie Synthesebedingungen

Qualitätsmerkmale

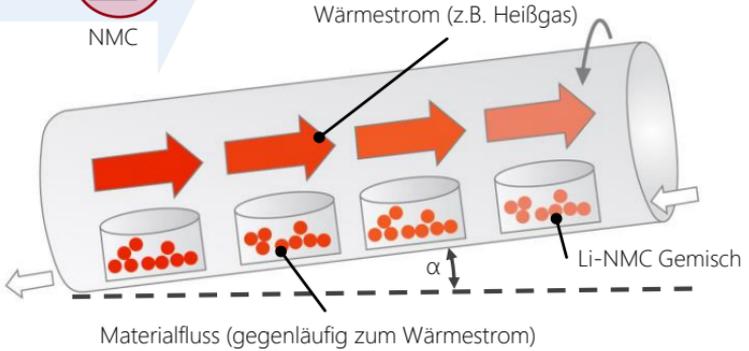
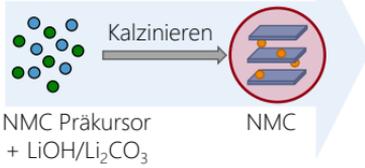
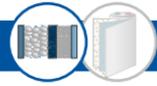
- Partikelgröße
- Gleichmäßigkeit der Partikelform
- Reinheit
- Partikelmorphologie

Mess- und Prüftechnik

- Restfeuchtwaaage, Rasterelektronenmikroskopie, Röntgendiffraktometrie, opt. Emissionsspektrometrie mitt. induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Kathodenmaterial

NMC-Festkörpersynthese



Mischen

Kalzinieren

Mahlen

Prozessschritte

- Das **Kalzinieren** ist für den Gesamtprozess besonders wichtig, da hierbei die endgültige chemische Zusammensetzung des NMC entsteht.
- In einem **Durchlaufofen** wird das Li-NMC in **keramischen Chargenbehältern**, kontinuierlich hintereinander gereiht, durch den Ofen transportiert.
- Die **Temperatur** legt maßgeblich die Partikelgröße fest und beeinflusst die Mobilität freier Elektronen, das Kristallwachstum und den Anteil an unerwünschten Nebenreaktionen, wie das Verdampfen von Lithium.
- Durch das **Verdampfen** werden große Mengen an Wärme absorbiert, sodass es zur Ausbildung von Temperaturgradienten kommt. Die **Erwärmungsrate** des Ofens wird bewusst gering gehalten, um ungleichmäßige Temperaturverteilungen zu verhindern.
- Über die **Reaktionsatmosphäre** lässt sich die Reinheit des Endprodukts beeinflussen. Die Homogenität der Atmosphäre spiegelt sich unmittelbar im Endprodukt wieder.

Prozessparameter

- Temperatur: 800 – 1.000°C
- Homogenität der Reaktionsatmosphäre
- Temperaturprofil
- Reaktionsdauer: abhängig von NMC-Stöchiometrie

Qualitätsmerkmale

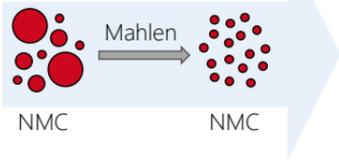
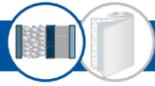
- Partikelgröße
- Homogenität
- Kristallstruktur
- Nebenreaktionen
- Reinheit
- Stoffmengenverhältnis

Mess- und Prüftechnik

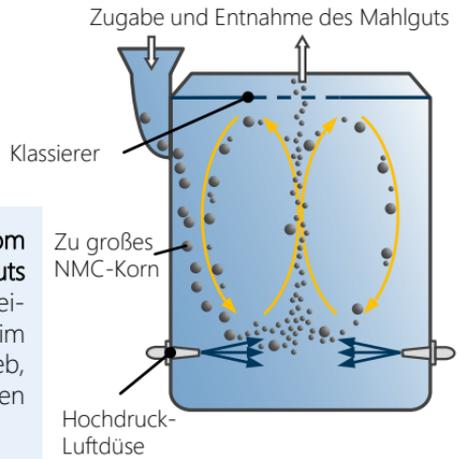
- Restfeuchtwage, Rasterelektronenmikroskopie, Röntgendiffraktometrie, opt. Emissionsspektrometrie mitt. induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Kathodenmaterial

NMC-Festkörpersynthese



Durch den kontinuierlichen **Luftstrom** stellt sich eine Zirkulation des **Mahlguts** innerhalb der Strahlmühle ein. Ausreichend feines Pulver passiert das im oberen Teil der Mühle angebrachte Sieb, während zu grobe Körner erneut in den Luftstrom zurückfallen.



Mischen

Kalzinieren

Mahlen

Prozessschritte

- Beim Kalzinieren ist es möglich, dass sich größere **Feststoffteilchen** bilden. Diese müssen im Folgeschritt **gemahlen** und **klassiert** werden, um ein für die Weiterverarbeitung benötigtes feines Pulver mit homogener Größenverteilung zu erzeugen.
- Im Bereich des Feinstmahls bietet sich der Einsatz einer **Luftstrahlmühle** an, welche das Mahlgut mit einem stark beschleunigten Gasstrom effizient zerkleinern kann.
- Die NMC-Körner werden auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt und zerkleinern sich durch **Kollisionen** gegenseitig.
- Beim **Klassieren** wird das gemahlene NMC nach der Korngröße sortiert. Zu große Körner fallen erneut in den Mahlprozess zurück, während Körner ab einer definierten Größe den Klassierer passieren können.

Prozessparameter

- Verwendetes Gas: Luft
- Geschwindigkeit: 300 m/s
- Partikelgröße: wenige Mikrometer

Qualitätsmerkmale

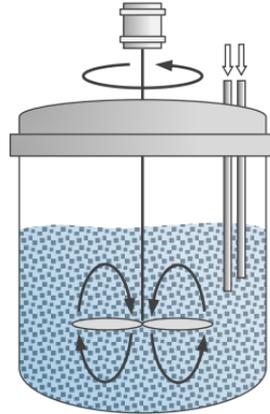
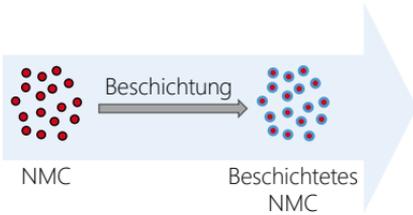
- Partikelgröße
- Partikelgrößenverteilung
- Gleichmäßige Partikelform
- Partikelmorphologie

Mess- und Prüftechnik

- Restfeuchtwage, Rasterelektronenmikroskopie, Röntgendiffraktometrie, opt. Emissionsspektrometrie mitt. induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Kathodenmaterial

NMC-Nachbehandlung



Beschichten

Prozessschritte

- Anschließend an das Feinstmahlen kann durch die **Nachbehandlung** der NMC-Partikel die Zyklenstabilität des Kathodenmaterials erhöht werden.
- Hierfür eignen sich unter anderem **Beschichtungen** der NMC-Partikel mit **Keramiken**.
- Die Beschichtungen können durch **nasschemische** oder **chemisches Gasphasenabscheidungs**-Verfahren aufgebracht werden.
- Nach dem nasschemische Verfahren muss eine **Trocknung** des beschichteten NMC-Materials durchgeführt werden.

Prozessparameter

- Beschichtungsmaterial
- Beschichtungsdicke
- Beschichtungsverfahren

Qualitätsmerkmale

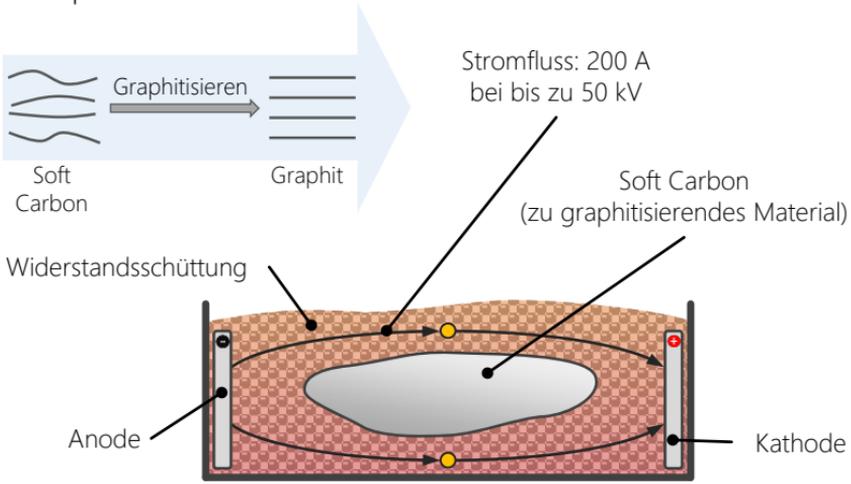
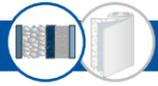
- Partikelgröße
- Partikelgrößenverteilung
- Gleichmäßige Partikelform
- Partikelmorphologie
- Homogene Partikelbeschichtung
- Reinheit der Partikelbeschichtung

Mess- und Prüftechnik

- Restfeuchtwage, Rasterelektronenmikroskopie, Röntgendiffraktometrie, opt. Emissionsspektrometrie mitt. induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Anodenmaterial

Graphitisieren



Graphitisieren

Prozessschritte

- Zunächst werden Koks und Pech als Ausgangsstoffe bei $> 200\text{ °C}$ im Intensivmischer oder Knetter gemischt.
- Im **Acheson-Ofen** wird die Mischung graphitisiert und erhält durch Anordnung der Graphen-Schichten seine typische **Graphitstruktur**.
- Das Soft Carbon wird von einer **Widerstandsschüttung** (z.B. körniges Koks) umgeben. Bei Anlegen eines Stromes entwickelt sich aufgrund des elektrischen Widerstands eine große Hitze.
- Hohe Reinheiten können durch eine thermische oder thermochemische Modifikation des Prozesses erreicht werden.
 - **Thermisch:** Die Temperatur und Verweilzeit werden erhöht, sodass alle Verunreinigungen verdampfen können.
 - **Thermochemisch:** Durch Additive werden die Verunreinigungen zu flüchtigen Verbindungen umgesetzt und diffundieren aus dem Graphit.

Prozessparameter

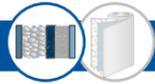
- Temperatur: $1.800 - 3.000\text{ °C}$
- Verweilzeit: wenige Stunden bis mehrere Wochen
- Spannung: z.B. $40 - 50\text{ kV}$
- Strom: z.B. 200 A

Qualitätsmerkmale

- Reinheit
- Partikelform
- Partikelgröße
- Homogenität
- Oberflächenstruktur

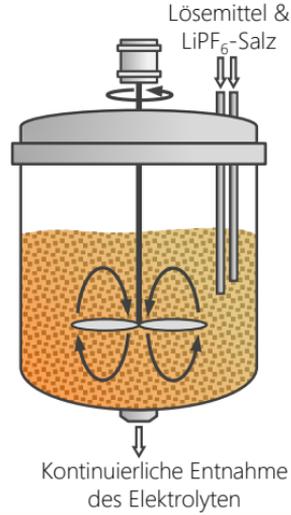
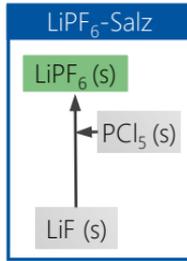
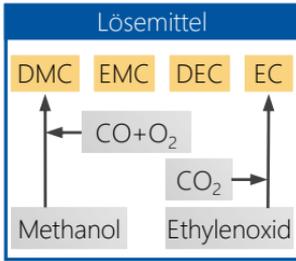
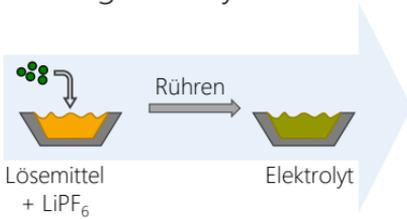
Mess- und Prüftechnik

- Röntgendiffraktometrie (XRD), Raman, Porosimetrie, opt. Emissionsspektrometrie mitt. induktiv gekoppeltel Plasma (ICP-OES)



Elektrolyt

Flüssigelektrolyt



Flüssigelektrolytherstellung

Prozessschritte

- Der Elektrolyt besteht aus Leitsalz (z.B. Lithiumhexafluorophosphat (**LiPF₆**)) und Lösemittel (z.B. Dimethylcarbonat (**DMC**), Ethylencarbonat (**EC**), Diethylcarbonat (**DEC**) oder Ethylmethylcarbonat (**EMC**)). Diese werden im Reaktor zusammengeführt.
- LiPF₆ ist als Leitsalz der wichtigste Bestandteil des Elektrolyten und macht den Hauptkostenanteil aus.
- Durch Additive (z.B. Vinylencarbonat (**VC**)) wird die **Langzeitstabilität** der Batterie verbessert.
- Verunreinigungen mit Wasser rufen eine **Zersetzungsreaktion** von LiPF₆ hervor, weshalb Rückstände sowie die Entstehung von Wasser vermieden werden müssen.

Prozessparameter

- Salzkonzentration: 0,8 – 2 mol/L
- Typische Zusammensetzung:
 - Salz: 12,6 wt%
 - Additive: 0 – 10 wt%
 - Lösemittel: ca. 85 wt%

Qualitätsmerkmale

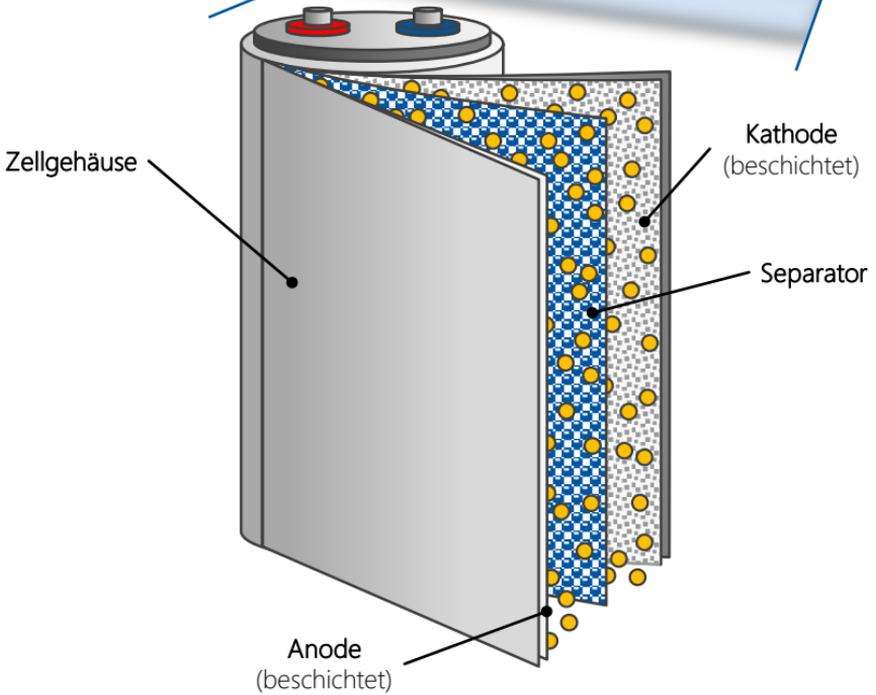
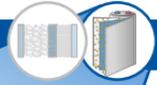
- Ionenleitfähigkeit
- Wassergehalt
- Temperaturbeständigkeit
- Reinheit der Ausgangsstoffe
- Reinheit des Endprodukts

Mess- und Prüftechnik

- Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC-MS), opt. Emissionsspektrometrie mitt. induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Inaktive Materialien

Kapitelübersicht



Elektrodenfolien

Separator

Zellgehäuse

Im Folgenden werden die Produktionsschritte zur Fertigung der **Elektrodenfolien**, des **Separators** und die **Zellgehäusefertigung** einer Rund- bzw. prismatischen Zelle sowie einer Pouchzelle erläutert. Die obere Abbildung zeigt eine aufgeschnittene Rundzelle mit direktem Blick auf Kathode, Anode und Separator.

Aufgaben des Separators

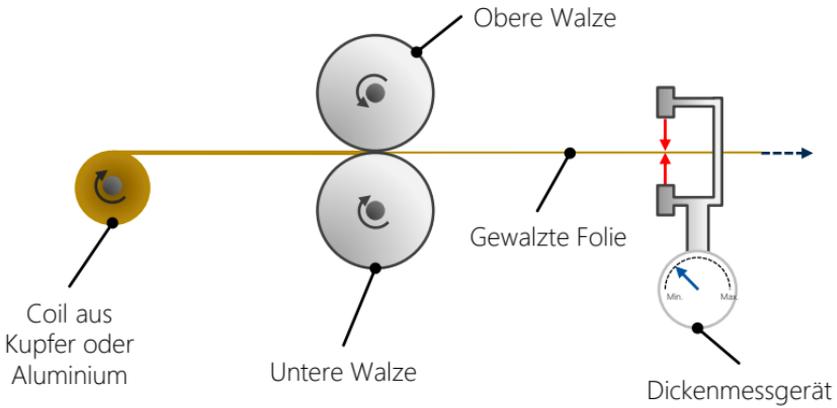
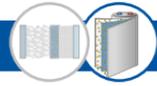
- Elektrischer Isolator
- Ermöglichen des Ionentransports
- Aufnahme der Elektrolytlösung
- Shutdown-Funktion (eine Sicherung gegen thermisches Durchgehen)

Aufgaben des Zellgehäuses

- Mechanischer Schutz des Zellinneren vor äußeren Einflüssen
- Vermeidung von Elektrolytaustritt
- Vermeidung von chemischen Reaktionen mit der Umgebung

Elektrodenfolienfertigung

Walzprozess



Walzprozess Elektrodenfolienfertigung

Prozessschritte

- Die Folie aus Kupfer oder Aluminium wird durch einen **kontinuierlichen Walzprozess** auf eine definierte Dicke gewalzt.
- Die obere und untere Walze sind gegenüber angeordnet und verdichten die Folie mit einem **definierten Liniendruck** auf die gewünschte Dicke.
- **Liniendruck** und **Vorschubgeschwindigkeit** der Folie werden über den Walzprozess **konstant** gehalten, um eine gleichmäßige Verdichtung zu erreichen.
- Zur Erhöhung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit wird die Dicke der Folie nach dem Walzen gemessen.
- Die **Sauberkeit** der Walzen ist entscheidend für den späteren Verarbeitungsprozess, da Fremdpartikel zu **Oberflächenschäden** führen können.
- Die Walzen und die Folie können durch **Absaugen** (in Kombination mit Druckluft) oder durch **Bürsten** gereinigt werden.

Prozessparameter

- Konstante Vorschubgeschwindigkeit
- Konstanter Liniendruck
- Walzdurchmesser

Qualitätsmerkmale

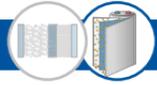
- Oberflächengüte
- Verunreinigungen
- Gleichmäßige Foliendicke
- Oberflächenrauheit der Walzen

Mess- und Prüftechnik

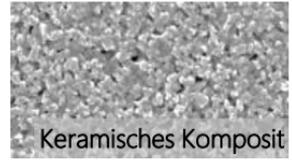
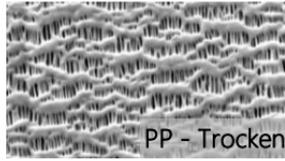
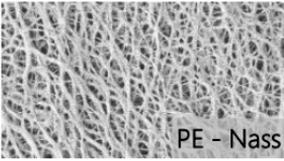
- Optische Prüfung, Dickenmessung, Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Separator

Übersicht



Separator-Typen



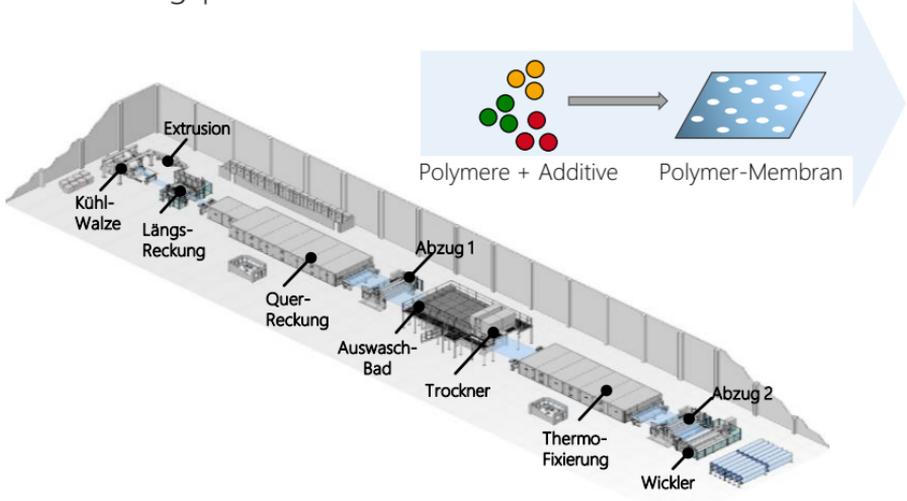
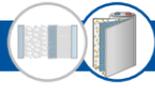
Zur Herstellung mikroporöser Separatoren existieren mehrere Technologien, die sich hinsichtlich der verwendeten Rohmaterialien und Herstellung unterscheiden. Die Herstellungsprozesse sind in der folgenden Übersicht dargestellt. Die in der Industrie üblicherweise verwendeten Verfahren werden anschließend erläutert.

Herstellungsprozess Weiterverarbeitung

Material	PE			PP			Komposit
Typ	Nass		Nass-Trocken	Trocken			PET-Vlies + Keramik
Cast-Prozess	Kühlwalze	Kühlwalze	Kühlwalze	Blasfolie	Kühlwalze	Kühlwalze	Spinnfaser
Reck-Prozess	Simultan Biaxial	Sequentiell Biaxial	Sequentiell Biaxial	Monoaxial	Monoaxial	Sequentiell Biaxial	---
Prozess Schritte							

Separator

Herstellungsprozess



Nassprozess

Trockenprozess

Der Nassprozess auf PE-Basis stellt das verbreitetste Herstellungsverfahren dar. Die Anlagen sind bis zu 110 m lang und können die Separatorfolie mit einer Arbeitsbreite von bis zu 5,5 m produzieren.

Der Nassprozess kann variieren, generell besteht dieser aus den im Folgendem gezeigten Prozessschritten:

- Extrusion

Mischverhältnis Rohstoffe
Temperatur: 200 – 240 °C
- Castfilm-Prozess

Abkühltemperatur: 20 – 40 °C
- Biaxiale Verstreckung

Reckverhältnis typ. 6x6
Temperatur: 100 – 130 °C
- Extraktion

Lösungsmittel
- Trocknung

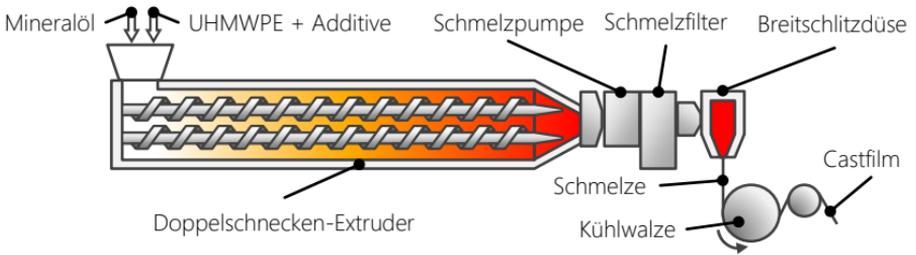
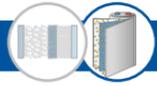
- Thermofixierung

Temperatur: 120 – 140 °C
- Abzug /
Qualitätskontrolle

- Aufwicklung


Separator

Nassprozess



Extrusion

Castfilm

Biaxiale Verstreckung

Prozessschritte



- Als **Ausgangsstoffe** für den **Nassprozess** werden Gemische aus HDPE (Polyethylen mit hoher Dichte) oder **UHMWPE** (Ultrahoch-molekulares Polyethylen), niedermolekulare Wachse oder Mineralöle als Weichmacher, sowie einigen Additiven verwendet.
- Das Gemisch wird in einem gleichlaufenden **Doppelschneckenextruder** dosiert, wo es durch Wärmezufuhr und Scherung **homogenisiert und aufgeschmolzen** wird. Eine **Schmelzpumpe** erzeugt einen konstanten, hohen Druck mit dem die Schmelze zur **Breitschlitzdüse** gefördert wird.

Extrusion

Castfilm

Biaxiale Verstreckung

Prozessschritte



- Die aus der Breitschlitzdüse **austretende Schmelze erstarrt** durch den Kontakt mit der Kühlwalze zum **Castfilm**. Hierbei kommt es auf eine möglichst gleichmäßige Abkühlung über die Arbeitsbreite und den Umfang an.

Extrusion

Castfilm

Biaxiale Verstreckung

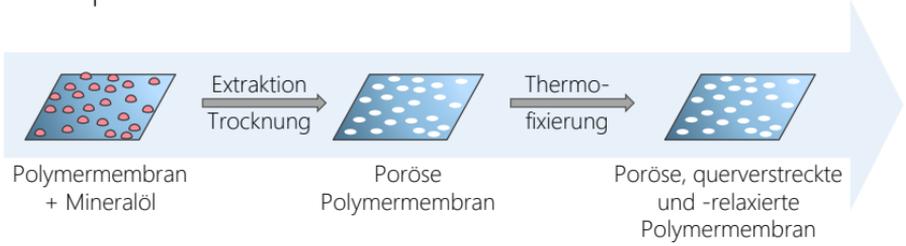
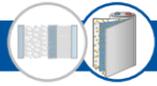
Prozessschritte



- Beim **biaxialen simultanen Verstrecken** werden die Folienränder von Kluppen gehalten, deren Abstand sich sowohl in **Laufrichtung** als auch **quer** dazu vergrößert.
- Beim **biaxialen sequentiellen Verstrecken** wird zuerst über **Walzen** in **Längsrichtung** verstreckt und danach über **Kluppen** in **Querrichtung**.

Separator

Nassprozess



Prozessschritte



- Das Ziel der **Extraktion** ist die Auswaschung des Mineralöls aus der extrudierten, verstreckten Folie. Die herausgelösten Moleküle hinterlassen Poren, sodass die **mikroporöse Struktur** entsteht.
- Mögliche **Lösungsmittel** sind Chlor- und Fluorkohlenwasserstoffe. Am verbreitetsten ist **DCM** (Dichlormethan).
- Für eine wirtschaftliche Produktion ist ein weitgehendes **Recycling** des DCM und des Mineralöls erforderlich, welche wieder in den Prozess eingespeist werden.



Prozessschritte



- Direkt nach der Extraktion erfolgt die **Trocknung**, mit der das DCM aus den entstandenen Poren durch Verdampfung entfernt wird.



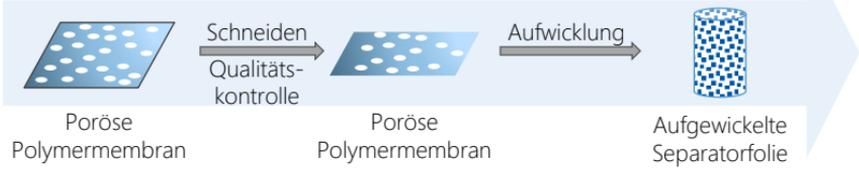
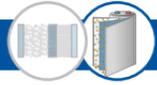
Prozessschritte



- Die Folie wird an den Rändern durch Haltekluppen fixiert und durch einen weiteren **Reckofen** geführt, um in **verschiedenen Temperaturzonen** ein Querverstreckung und -relaxierung durchzuführen.

Separator

Nassprozess



Abzug / Qualitätskontrolle

Aufwicklung

Prozessschritte



- Die nach dem Verlassen der Thermofixierung fertig hergestellte Separatorfolie wird in einem **Abzugständer** an den Rändern beschnitten und es wird eine **Inline-Qualitätskontrolle** (Dicke, optische Defekte, u.a.) durchgeführt.

Abzug / Qualitätskontrolle

Aufwicklung

Prozessschritte



- Der letzte Arbeitsschritt ist das **kontrollierte Aufwickeln**, das in der Regel auf einem Wickler mit voller **Arbeitsbreite von maximal 5,5 m** erfolgt.

Qualitätsbestimmende Prozessparameter

- Homogenität und Reinheit der Rohstoffe
- Temperaturregelgüte
- Geschwindigkeitskonstanz
- Dickenregelung
- Sauberkeit
- Wickelqualität

Qualitätsmerkmale Membran

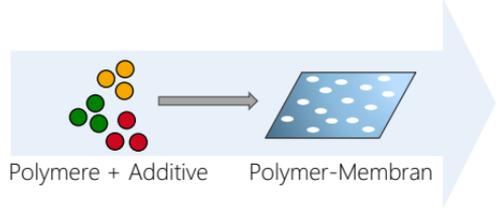
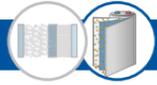
- Homogene Foliendicke und Porenweitenverteilung
- Elektrolytbenetzbarkeit

Mess- und Prüftechnik

- Dicke, Zugprüfung, Durchstossprüfung, Durchschlagspannung
- Hg-Porosimetrie, Rasterelektronenmikroskopie, Luftdurchlässigkeitstest nach Gurley
- Schrumpfmessung, DSC, TMA, Hot-Tip Test
- Ionenleitfähigkeit, Elektrolytbenetzung
- Optische Inspektion

Separator

Herstellungsprozess



Nassprozess

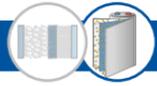
Trockenprozess

Beim Trockenprozess werden als Ausgangsstoffe die teilkristallinen Thermoplasten PP oder PE eingesetzt. Auch beim Trockenprozess können die im Folgenden erläuterten Prozessschritte variieren.

- Extrusion  Extrusionstemperatur
- Castfilm-Prozess 
- Blasfolien-Prozess  Aufblasverhältnis
- Schneiden 
- Laminieren 
- Längsrecken  Reckparameter
- Biaxiale Verstreckung  Reckparameter
- Abzug / Qualitätskontrolle 
- Aufwicklung 

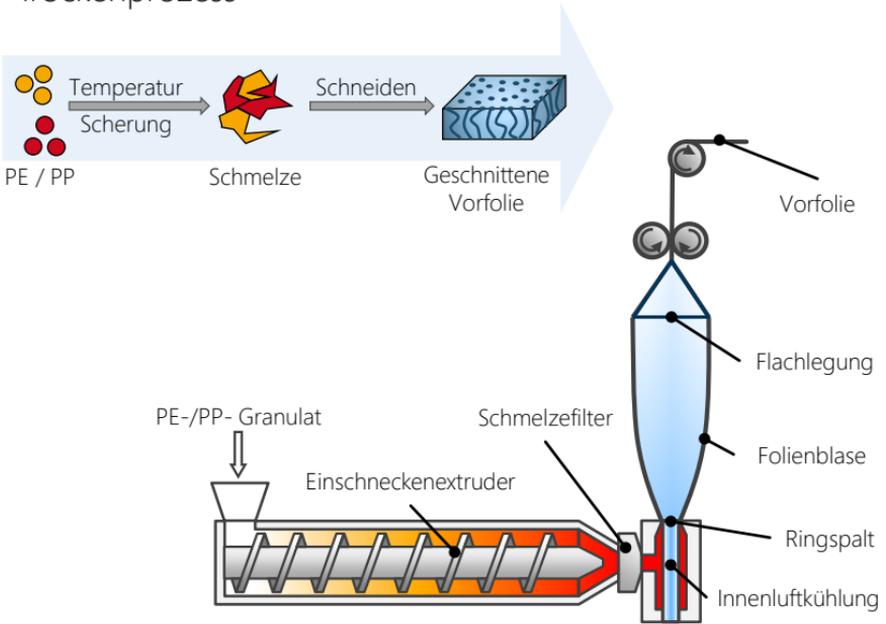
Mess- und Prüftechnik

- Dicke, Zugprüfung, Durchstossprüfung, Durchschlagspannung
- Hg-Porosimetrie, Rasterelektronenmikroskopie, Luftdurchlässigkeitstest nach Gurley
- Schrumpfmessung, DSC, TMA, Hot-Tip Test
- Ionenleitfähigkeit, Elektrolytbenetzung
- Optische Inspektion



Separator

Trockenprozess



Extrusion

Blasfolien-Prozess

Schneiden

Prozessschritte



- In einem Einschneckenextruder wird das PE-/PP-Granulat durch Wärmezufuhr und Scherung **aufgeschmolzen** und homogenisiert.

Extrusion

Blasfolien-Prozess

Schneiden

Prozessschritte



- Im Trockenprozess gibt es alternativ einen **Castfilm-** und einen **Blasfolien-Prozess**.
- Beim Blasfolien-Prozess wird die Schmelze durch einen **Ringspalt** gepresst, sodass ein **Schlauch** entsteht. Dieser wird von innen mit Luft durchströmt sowie von innen und außen gekühlt.

Extrusion

Blasfolien-Prozess

Schneiden

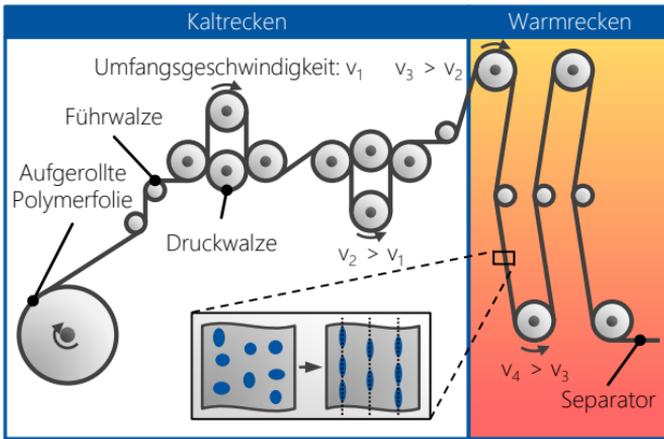
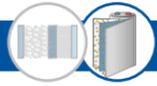
Prozessschritte



- Die Vorfolie wird nach dem Aufwickeln **batchweise** auf einer **Schneidmaschine** in schmalere Rollen überführt.

Separator

Trockenprozess



Prozessschritte



- Die Rollenware wird in einem Folgeschritt mit **mehreren Lagen** unter **Druck** und **Temperatur zusammenlaminiert**. So kann u. a. eine „Trilayer“ Struktur PP / PE / PP erzeugt werden.



Prozessschritte



- Um eine Porenstruktur zu erzeugen ist eine Strukturierung mit in Reihe angeordneten **Lamellen**, die senkrecht zur Maschinenrichtung liegen, erforderlich. Diese Struktur wird durch einen 2-stufigen Reckprozess erzeugt.
- Beim **Längsrecken** wird der Reckvorgang durch unterschiedliche Walzengeschwindigkeiten bei verschiedenen Temperaturen realisiert.
 - Kaltrecken:** Initiierung des Porenwachstums
 - Warmrecken:** Erzeugung und Vergrößerung der Poren
- Anschließend wird der Separator nach dem Recken über beheizte Walzen **thermofixiert**, um die Schrumpfwerte zu reduzieren.



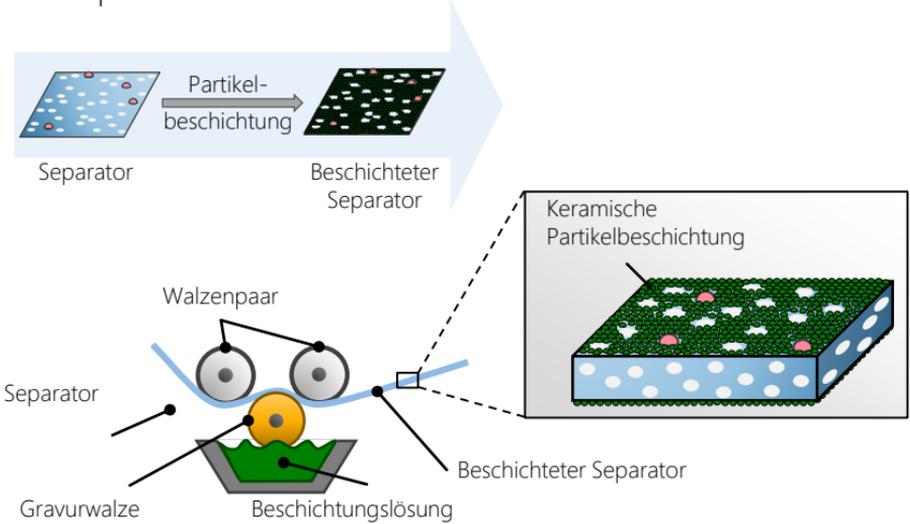
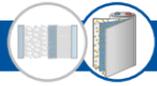
Prozessschritte



- Der Separator wird an den **Rändern beschnitten** und die Inline-Qualitätskontrolle (Dicke, optische Defekte, u.a.) durchgeführt.
- Anschließend wird der Separator **aufgewickelt**.

Separator

Komposit-Membran



Alle nach dem Nass- oder Trockenprozess hergestellten PP- und PE-Separatoren können mit funktionellen Materialien beschichtet werden, um die thermische Stabilität oder Laminierbarkeit zu verbessern. Eine keramische Beschichtung bzw. Imprägnierung von PET-Vliesen wird auch zur Herstellung hochtemperaturbeständiger Separatoren eingesetzt.

Partikelsynthese

Beschichtung

Prozessschritte

- Die **keramischen Partikel** aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), Aluminium-Oxid-Hydroxid (AlOOH) oder SiO_2 werden durch ein **thermisches Verfahren** bei hohen Temperaturen aus dem jeweiligen Metallchlorid hergestellt.
- Eine Suspension aus keramischen Partikeln und Binder wird durch eine **Gravurwalze** auf die Separatorfolie aufgebracht.
- Nach der Beschichtung, die einseitig oder doppelseitig erfolgen kann, ist eine **Trocknung** erforderlich.

Prozessparameter

- Prozessdauer bei Partikelsynthese
- Wahl des Binders
- Härte der Rasterwalze
- Reinigungszyklus Rasterwalze
- Temperaturprofil Trocknung

Qualitätsmerkmale

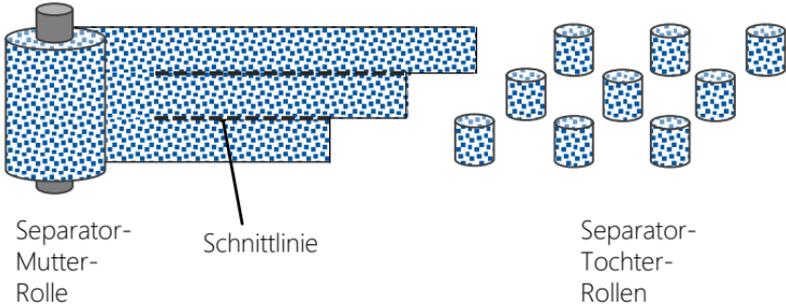
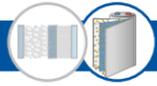
- Partikelgrößenverteilung
- Partikelform
- Benetzbarkeit
- Homogenität Beschichtung
- Beschichtungsdicke

Mess- und Prüftechnik

- Dickenmessung, Optische Prüfung, Rasterelektronenmikroskopie (REM), Kontaktwinkel, Gurley-Messung, Schrumpf-Messung, Porometer, Adhäsionstest, Elektrolytaufnahme/-benetzbarkeit, Hot-Tip-Test, Hot-ER-Test (Elektrolytleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur)

Separator

Slitting



Nach der Herstellung bzw. nach der Beschichtung werden die Separatoren durch Schneidmaschinen auf die für die Zellfertigung benötigte Breite zugeschnitten.

Slitting Separator

Prozessschritte

- Beim Slitting wird ein breites Separatorband (**Mutter-Rolle**) in schmalere Separatorbänder (**Tochter-Rollen**) geschnitten.
- Bei dem Trennvorgang wird meist ein **Primär-Schneidvorgang** benötigt, um z.B. die Arbeitsbreite von 5,5 auf 1,5 m zu reduzieren. Danach erfolgt der **Sekundär-Schneidvorgang**, um auf die für die Zellfertigung benötigte Breite zu konfektionieren.
- Anschließend werden Staub und Fremdpartikeln durch spezielle **Reinigungsvorrichtungen** entfernt.
- Wichtige Qualitätskriterien sind die **Schnittgüte** der entstehenden Ränder und die **Sauberkeit** der Separatorbahn.

Prozessparameter

- Schnittgeschwindigkeit
- Schnittbreite
- Wickelzüge

Qualitätsmerkmale

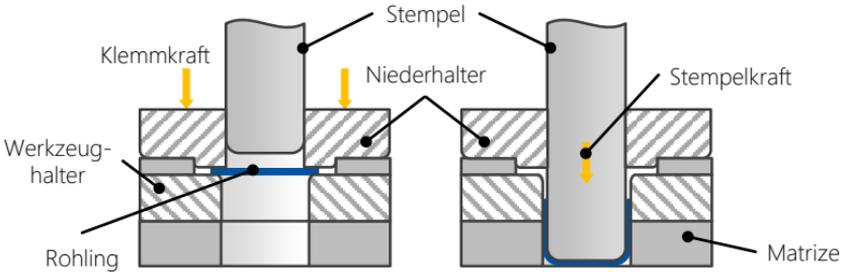
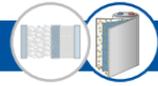
- Gratbildung
- Verschmutzungsgrad
- Schnittkantengeometrie
- Bahnkantengenauigkeit

Mess- und Prüftechnik

- Optische Prüfung, Rasterelektronenmikroskopie (REM), Dickenmessung, Ultraschallsensorik, Längen- und Breitenbestimmung

Zellgehäusefertigung

Rundzelle / Prismatische Zelle



Tiefziehen

Waschen/Trocknen

Prüfen

Prozessschritte

- Das **Tiefziehen** ist ein Zugdruckumformverfahren bei dem Blechzuschnitte zu einem einseitig offenen Hohlkörper gepresst werden. Wegen der guten Prozessführung eignet sich dieses Verfahren besonders für die Massenfertigung. Die Investitionen in Maschinen und Werkzeuge sind hoch.
- Das Rohmaterial wird mit einem **Stempel** durch eine Matrize gedrückt, sodass ein rundes oder prismatisches Gehäuse entsteht. Dieses Vorgehen wird in mehreren Stationen mit unterschiedlichen Werkzeuggeometrien (Stempel und Matrize) so oft wiederholt, bis die gewünschte Form des fertigen Gehäuses erreicht ist.
- Nach dem letzten Tiefziehschritt wird das überschüssige Material am oberen Ende sauber abgetrennt.
- Abschließend wird das Gehäuse **gewaschen, getrocknet** und **geprüft**.
- Als Alternative kann zur Zellgehäusefertigung auch das **Rückwärtsfließpressen** eingesetzt werden.

Prozessparameter

- Bauteilformat (rund oder prismatisch)
- Bauteilgröße (Bauteilhöhe)
- Material
- Blechdicke
- Umformkraft
- Ziehgeschwindigkeit

Qualitätsmerkmale

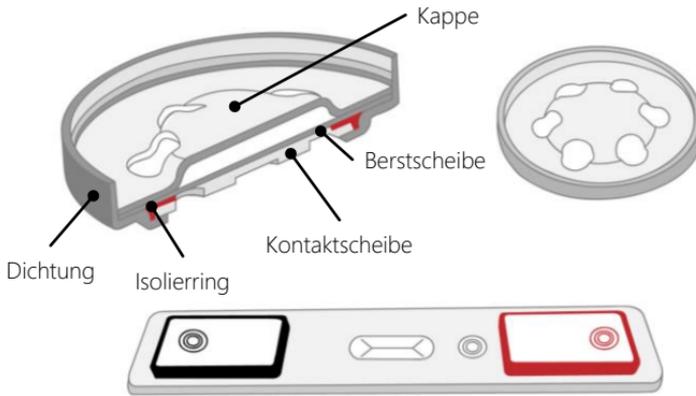
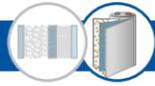
- Maßhaltigkeit
- Gleichmäßigkeit der Wandstärke
- Kantenbeschaffenheit
- Oberflächengüte
- Sauberkeit
- Restpartikel
- Spannungen im Material

Mess- und Prüftechnik

- Optische Prüfung, Wirbelstromtest, Drucktest, Dichtigkeitsprüfung

Zelldeckelfertigung

Rundzelle / Prismatische Zelle



Komponentenfertigung

Montage

Prüfen

Prozessschritte

- Die einzelnen Komponenten einer Deckelbaugruppe bestehen aus **metallischen Bauteilen** und aus **Kunststoffbauteilen**. Die metallischen Komponenten werden durch Stanzen, Feinschneiden, Kaltumformen, Tiefziehen, Ätzen oder Reibschweißen hergestellt, z.T. auch nachträglich galvanisch behandelt. Für Kunststoffbauteile kommt das Spritzgussverfahren zum Einsatz. Aufgrund der Empfindlichkeit von Bauteile, die in der Baugruppe sicherheitsrelevante Aufgaben übernehmen müssen, werden Komponenten z.T. auch in gegurteter Form oder orientiert in speziellen Bauteilträgern der Montage bereitgestellt.
- Die **Montage** einer Deckelbaugruppe erfolgt zum Teil in Reinräumen mit **vollautomatisierten Anlagen**. Neben dem Handling der einzelnen Bauteile einer Deckelbaugruppe kommen in der Montage Prozesse wie das Laserschweißen, Nieten und Dosieren von Dichtmittel zur Anwendung. Verschiedene Komponenten beinhalten Poka-Yoke Elemente, um eine fehlerfreie Montage zu garantieren.
- Während und nach der Montage erfolgen **optische und elektrische Prüfungen**. Dichtheitsprüfungen von lasergeschweißten Verbindungen sind ebenfalls erforderlich.

Prozessparameter

- Deckelbaugruppengröße
- Passgenauigkeit der Bauteile
- Anzahl Komponenten
- Montagegeschwindigkeit

Qualitätsmerkmale

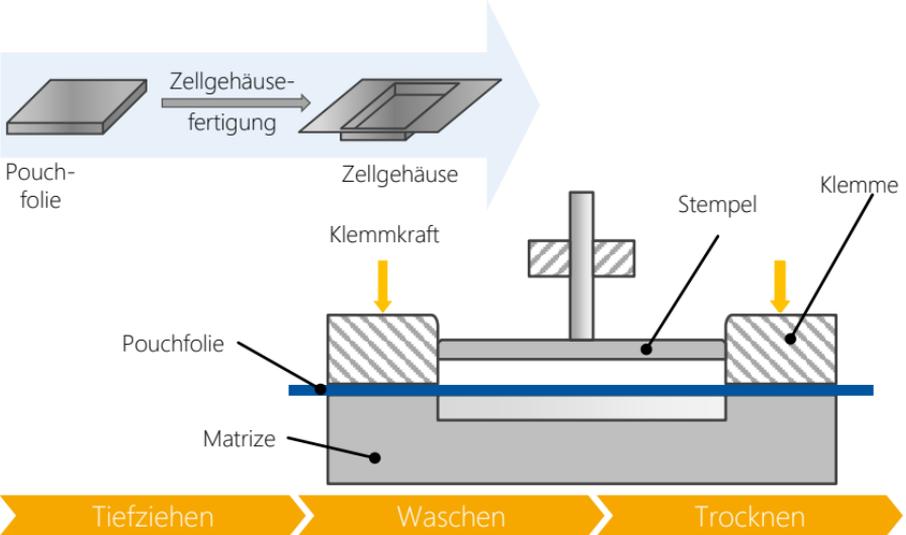
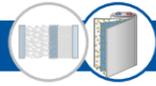
- Sauberkeit
- Restpartikel
- Geometrische Maßhaltigkeit
- Dichtheit

Mess- und Prüftechnik

- Optische Prüfung, Dichtigkeitsprüfung, Prüfung des elektrischen Widerstands, elektrische Durchschlagsprüfung

Zellgehäusefertigung

Pouchzelle



Prozessschritte

- Die **Pouchfolie** besteht aus einer **Kunststoffverbundfolie**. Als Kunststoffe werden **Polyamide** und **Polypropylen** eingesetzt. **Aluminium** dient als Diffusionssperre für Wasser und den Elektrolyt.
- Die Bereitstellung der Pouchfolie erfolgt über eine **diskontinuierlich** arbeitende Spule.
- In der Presse wird die abgewickelte Folie durch zwei Klemmen mit einer definierten **Klemmkraft** festgehalten.
- Der Stempel drückt die Folie in die **Matrize**, sodass die endgültige Form entsteht. Das überschüssige Material wird am oberen Ende sauber abgetrennt.
- **Stempelkraft** und **Stempelgeschwindigkeit** haben hierbei einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität des Gehäuses.

Prozessparameter

- Stempelgröße
- Stempelform
- Matrizenhöhe
- Klemmkraft
- Druckkraft
- Stempelgeschwindigkeit

Qualitätsmerkmale

- Oberflächengüte
- Verunreinigungen
- Gleichmäßigkeit der Wanddicke
- Risse im Material
- Kantenbeschaffenheit
- Foliendicke

Mess- und Prüftechnik

- Optische Prüfung, Dichtigkeitsprüfung



Batterieproduktion

Das PEM der RWTH Aachen ist seit vielen Jahren im Themenfeld der Lithium-Ionen-Batterie-Produktion aktiv. 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 Zellausbaueinheit 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
Geschäftsführender Oberingenieur
H.Heimes@pem.rwth-aachen.de



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



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



Kim D. Kreisköther
Battery Components
Kim.Kreiskoether@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!

Frankfurt am Main, Juli 2019
PEM der RWTH Aachen und VDMA Eigendruck,
1. Auflage
ISBN: 978-3-947920-06-8