

Prozessteckbriefe für die
Elektrodenfertigung von
Prismatischen Zellen, Pouch
Zellen und Zylindrischen Zellen

Fraunhofer FFB; Dr. Oliver Krätzig, Sebastian Kühn, Leonhard
Dworog
24.05.2024

„Exakte Abwaage und Zusammenführung chemischer Rohmaterialien“

Übersicht

Lager

Restriktionen:
 cte%
 xz%
 w %

Fertigungskette

Prozessbeschreibung

Material Einbringung:
 Annahme, sichere/Eigenschaften bewahrende Lagerung und Qualitätskontrolle der chemischen Rohkomponenten für Anoden- und Kathodenfertigung.

Dosieren:

Bereitstellung

Konstante Bereitstellung von Rohmaterialien aus der Lagerung unter Sicherstellung der Vermeidung von Cross-Kontamination. Potentielle Zugabe von Recyclat aus Re-X Prozessen.

Dosierung

Exakte dosierte Ausgabe von festen chemischen Rohmaterialien in einem individuell vorab festgelegten Verhältnis. Potentielle Zugabe von Recyclat aus Re-X Prozessen.

Mischen:

Homogenisierung und Strukturierung der dosierten Rohmaterialien unter Zugabe von Lösemittel zur Herstellung pastöser Beschichtungsmassen

Ziele und Motivation

Die Dosierung legt den Grundstein für eine gut funktionierende Batteriezelle durch die exakte Zusammenstellung eines optimierten Verhältnisses aus mehreren festen Rohchemikalien (Elektroden Aktivmaterial, Binder, Leitrub, Additive), welche im weiteren Verlauf die Anode oder Kathode bilden.

Herausforderungen

- Rohmateriallogistik:** In der Großserienproduktion müssen auch die Aspekte der Rohmateriallogistik, wie die Anlieferung und Handhabung von Materialien, berücksichtigt werden, um Effizienz und Ressourceneffizienz zu gewährleisten.
- Qualitätskontrolle:** Alle angelieferten und länger gelagerten Produkte müssen in Regelmäßigen Abständen auf den Erhalt der chemischen Zusammensetzung kontrolliert werden.
- Exakte Formulierung:** Abweichungen von der gewünschten Rezeptur können einen signifikanten Einfluss auf die endgültige Zellperformance haben und sind nach diesem Produktionsschritt nicht mehr auszugleichen.
- Cross-Kontamination:** Kontamination mit anderen, möglicherweise vorher dosierten Rohmaterialien, sind ebenso unbedingt zu vermeiden.
- Verschleißfestigkeit:** Prozesse mit Feststoffen können zu erhöhtem Verschleiß führen, insbesondere bei abrasiven Materialien, und erfordern daher eine hohe Verschleißfestigkeit der Anlagen.
- Flexibilität:** Aufgrund sich dauernd ändernder Elektrodenformulierungen (z.B. für High-Power oder High-Energy Zellen) muss die Dosierungsanlage flexibel, schnell, und am besten automatisch, ohne das Risiko der Cross-Kontamination den Zugriff auf Rohmaterialien wechseln können.
- Durchsatz und Kontinuität:** Geschwindigkeitszunahme während der Batteriefertigung erfordert zukünftig entweder exakte Dosierung in hohen Maßstäben oder kontinuierliche exakte Dosierung.
- Pulverhandling:** Das korrekte Handling von Pulvermaterialien, einschließlich Lagerung und Zuführung, ist entscheidend, um kontaminationsfreies Arbeiten sicherzustellen.

Energieaufwand und Kosten*

Prozessparameter & -ausprägungen

Qualitätsspezifische Parameter	Übliche Wertekorridore	Messmethoden zur Kontrolle
Reinheit	>99,5% (battery grade)	Analytische Methoden (NIR ¹ -/Raman Spektroskopie, GC-MS ² , ICP-OES ³)
Partikelgrößenverteilung (PSD)	ca. ±0,5-1σ	Laserbeugung
Schüttdichte	Abhängig von der PSD	Tappes Density Tester
Partikelmorphologie	Divers	Mikroskopische Methoden (REM ⁴ , Laser Mikroskop)
Wassergehalt	Divers, trocken	Karl-Fischer-Titration

Parameter der Prozessführung	Übliche Wertekorridore	Rückkopplung Qualitätsparameter
Dosiergenauigkeit	Feststoff: <± 0,5 Gew. % Flüssigkeit: <± 0,1 Vol. %	

Anforderungen an die Betriebsumgebung	Ausprägungen	Implikationen für den Prozess
Luftabzug bei Dosierung	Gesundheitsschädliche Feststoffe (lungengängiges Leitrub, karzinogenes NiMC) müssen aus der Luft gefiltert werden	Dosierung finden i.d.R. in abgeschlossenen „Pulverabfüll Stationen“ statt

F&E Wissensträger

¹NIR = Near-Infrared

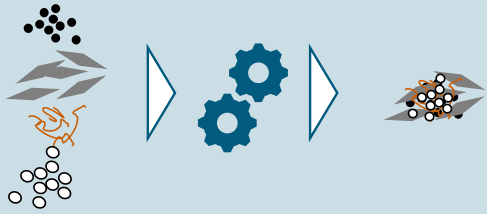
²GC-MS = Gaschromatographie-Massenspektrometrie

³ICP-OES = inductively coupled plasma optical emission spectrometry (engl.) / optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas (dt.)

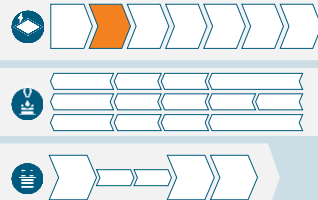
⁴REM = Rasterelektronenmikroskopie

„Homogenisierung und Strukturierung der Ausgangsmaterialien“

Übersicht



Fertigungskette



Prozessbeschreibung

Materialanlieferung & Dosierung:

Bereitstellung pulverförmiger Feststoffe sowie flüssiger Lösemittel zur weiteren Verarbeitung im Mischprozess

Mischen:

Pulverkonditionierung	Trockenvormischen	Nassdispersieren
Selektiver Einsatz hoher Mischintensitäten zur gezielten Strukturveränderung von Ausgangsmaterialien (z.B. Deagglomeration, Rußaufschluß, etc.)	Bei geringer Mischintensität werden die Komponenten distributiv vermischt, sodass alle Ausgangskomponenten gleichmäßig verteilt in der Mischung vorliegen	Benetzung von Pulvermischungen mit Lösemittel sowie Zerteilung von Agglomeraten zur Herstellung pastöser Beschichtungsmassen

Trocknen:

Graduiertes trocknen der beschichteten Elektrodenfolie zur Entfernung des Großteils der flüssigen Bestandteile der aufgetragenen Elektrodenpaste.

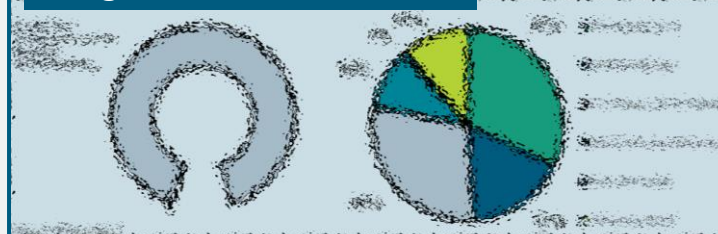
Ziele und Motivation

Hauptziel des Mischprozesses ist die Präparation von Pasten aus verschiedenen Feststoffmaterialien und flüssigen Lösungsmitteln, die durch Gewährleistung der Kontrolle der Eigenschaften (Homogenität, Feststoffanteile, Korngrößen und Morphologien, usw.) für die Weiterverarbeitung hin zu großformatigen Zellen geeignet sind.

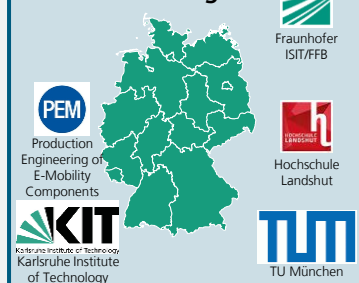
Herausforderungen

- **Reduzierung von Energiekosten:** Aufgrund steigender Energiepreise ist eine ressourceneffiziente Prozessierung von großer Bedeutung, insbesondere die Reduzierung oder Beseitigung von Lösungsmitteln, um die Kosten für die Trocknung der Elektroden zu senken.
- **Anpassung an lösemittelfreie Prozessierung:** Der Verzicht auf Lösungsmittel sollte bei der Auslegung und dem Betrieb von Anlagen sowie bei Transport und Dosierung von Materialien berücksichtigt werden.
- **Temperaturmanagement:** In lösemittelfreien Prozessen müssen Materialien möglicherweise gekühlt oder gezielt erwärmt werden, um den Bänderaufschluss zu erleichtern, was ein effizientes Temperaturmanagement erfordert.
- **Verschleißfestigkeit:** Lösemittelfreie Prozesse können zu erhöhtem Verschleiß führen, insbesondere bei abrasiven Materialien, und erfordern daher eine hohe Verschleißfestigkeit der Anlagen.
- **Veränderung der Fließeigenschaften:** Strukturierte Mischungen in lösemittelfreien Prozessen sind oft kohäsiver und nicht frei fließend, was neue Herausforderungen in Bezug auf Lagerung und Dosierung der Materialien mit sich bringt.
- **Flexibilität und Durchsatz:** Aufgrund sich ändernder Anforderungen an Batteriezellen und Materialien (Pulver-, Aktivmaterialien und Reinigungssystem) müssen Mischprozesse einen hohen Durchsatz bieten und gleichzeitig flexibel auf Materialwechsel reagieren können.
- **Qualitätskontrolle:** Die Überwachung von Qualitätsparametern ist entscheidend, um Produktionsausschuss zu minimieren, insbesondere in lösemittelfreien Prozessen, die neue Ansätze erfordern.

Energieaufwand und Kosten*



F&E Wissensträger



Prozessparameter & -ausprägungen

Qualitätsspezifische Parameter



Qualitätsparameter des Prozessproduktes	Übliche Wertekorridore	Messmethoden zur Kontrolle
Viskosität	1.000 – 6.000 mPa*s	Rheometer
Homogenität		Opt. Zeilenkameras; IR-/Raman-Spektroskopie; Dichtemessung (z.B. Coriolis-Biegeschwinger)
Reinheit	>99,5% (battery grade)	Stichprobenmessung (IR/Raman, MS)
Suspensions- / Rußagglomeratdichte	Agglomerate <30µm	Ultraschall; dynamische Lichtstreuung
Feststoffgehalt	40-65%	Feststoff-/Flüssigeinwaage; Ultraschall

Prozessspezifische Parameter



Parameter der Prozessführung	Übliche Wertekorridore	Rückkopplung Qualitätsparameter
Technische Verfügbarkeit (VDI 3423)	>95%	
Mischdauer	<5h	
Temperatur	20-40°C	Gesamt-Schwankungen Qualitätsparameter <5%
Durchsatz	110-1200 t/h	
Materialverluste bei Anlagenumrüstung	<1% (Batch)	Zeitoptimierter Ramp-Up

Betriebsumgebung



Anforderungen an die Betriebsumgebung	Ausprägungen	Implikationen für den Prozess
Konzentration luftgeladener Teilchen	ISO 8	Sauber- bzw. Reinraum und Versorgung mit entsprechender Filtertechnik
Feuchtigkeitsgehalt der Luft in Betriebsumgebung	Materialien haben unterschiedliche Anforderungen an die Luftfeuchte (z.B. Ni-reiche Kathoden sensibel, Graphit unkritisch)	Trockenraumtechnik z.T. noch nicht erforderlich

„Exakte Auftragung der gemischten Elektroden-Paste auf die Stromsammlerfolie“

Übersicht

Kontinuierlich (zylindrisch/prismatisch)

intermittierend (prismatisch/pouch)

Fertigungskette

Prozessbeschreibung

Mischen:
Homogenisierung und Strukturierung der dosierten Rohmaterialien unter Zugabe von Lösemittel zur Herstellung pastöser Beschichtungsmasse.

Beschichten:

Bereitstellung der Muttercoil und Elektrodenpaste

Bereitstellung von Rohmaterialien aus der Lagerung und dem Mischprozess in einer ununterbrochenen Weise

Beschichtung

Exaktes dosiertes Aufbringen der Elektrodenrohpaste also homogene Schicht auf die Stromsammlerfolie.

Trocknen:

Graduiertes trocknen der beschichteten Elektrodenfolie zur Entfernung des Großteils der flüssigen Bestandteile der aufgetragenen Elektrodenpaste.

Ziele und Motivation

Während der Beschichtung wird die pastöse Elektrodenrohmasse auf den jeweiligen Stromsammlerfolie zielgenau und homogen aufgebracht. In diesem Prozessschritt wird der spätere Zelltyp anhand einer kontinuierlichen oder intermittierenden Auftragung festgelegt.

Herausforderungen

- Homogenität:** Eine gleichmäßige Aufbringung der Elektrodenpaste als homogene Fläche auf den Stromsammler, ohne Unterbrechungen, signifikante Höhenunterschiede beeinflusst sowohl den idealen Ablauf der weiteren Prozesse als auch die Finale Batterie-Performance und Fehleranfälligkeit.
- Sauberkeit/Exaktheit:** Exakte/saubere Auftragung der Elektrodenpaste auf den Stromsammler muss ohne Verschmieren und mit exakten Kanten passieren, um spätere Prozesse ideal durchführen zu können.
- Adhäsion:** Die Elektrodenpaste muss einen festen Verbund mit dem Stromsammler eingehen und darf in der folgenden Produktion diesen nicht verlieren.
- Flexibilität:** Unterschiedliche Zellformate verlangen nach unterschiedlicher Beschichtung (Kontinuierlich/intermittierend/shaped). Idealerweise können alle Varianten von einem Beschichter flexibel durchgeführt werden
- Durchsatz:** Das Aufbringen der Elektrodenpaste muss in erhöhter Geschwindigkeit $\geq 100 \text{ m min}^{-1}$ ohne Qualitätsverluste passieren.
- Qualitätskontrolle:** Auch bei hohen Geschwindigkeiten müssen Qualitätsstandards eingehalten und mit potenten Methoden kontrolliert werden.
- Zweiseitige Beschichtung:** Die Aufbringung der Elektrodenrohmasse muss vor dem Prozessschritt des Kalandrierens (#5) beidseitig erfolgen.

Energieaufwand und Kosten*

Prozessparameter & -ausprägungen

Qualitätsspezifische Parameter	Übliche Wertekorridore	Messmethoden zur Kontrolle
Oberflächengüte	Keine Defekte (Blasen, Kratzer, Schlieren etc.)	Optische Bildprüfung, Aufl. < 0,1 mm
Nassschichtdicke / -Homogenität	Anode: 50 – 100 µm Kathode: 40 – 200 µm	Konfokal-Messsensor, Genauigkeit 1µm
Adhäsion		Optische Bildprüfung
Ziel-Flächengewicht	± 1 Gew. %; Genauigkeit < 0,5 %	Ultraschallsystem, Röntgen/β-Strahler

Prozessspezifische Parameter	Übliche Wertekorridore	Rückkopplung Qualitätsparameter
Beschichtungsgeschwindigkeit	> 80 m/min	
Beschichtungsbreite	< 1500 mm	
Temperaturregelung der Breitschlitzdüsen	± 0,5 °C	
Kantengeometrie	seitl. Elektrodenversatz (beids. Besch.) < 0,5 mm, Toleranzen Besch.breite: ±0,1 mm	Optische Bildprüfung, (Laser-)Liniensensor

Betriebsumgebung	Anforderungen an die Betriebsumgebung	Ausprägungen	Implikationen für den Prozess
	Konzentration luftgeladener Teilchen	ISO 8	Sauber- bzw. Reinraum und Versorgung entsprechender Filtertechnik
	Feuchtigkeitsgehalt der Luft in Betriebsumgebung	Materialien haben unterschiedliche Anforderungen an die Luftfeuchte (z.B. Ni-reiche Kathoden sensibel, Graphit unkritisch)	Trockenraumtechnik z.T. noch nicht erforderlich

F&E Wissensträger

„Heraustrocknung der flüssigen Bestandteile der Elektrodenpaste“

Übersicht

Fertigungskette

Prozessbeschreibung

Beschichten:
Exaktes dosiertes Aufbringen der Elektrodenrohpaste also homogene Schicht auf die Stromsammelrolle.

Trocknen:

Kontinuierlicher Transport

Kontinuierliche Bereitstellung von beschichteter „nasser“ Elektrodenfolie ohne zwischenzeitliche Vereinzeln der der selbigen.

Trocknung

Graduiertes trocknen der beschichteten Elektrodenfolie zur Entfernung des Großteils der flüssigen Bestandteile der aufgetragenen Elektrodenpaste.

Kühlung

Herunterkühlen der aufgeheizten Elektrodenfolie im Roll-zu-Roll Prozess über Kühlrollen.

Kalandern:

Homogenisierung und Verdichtung der getrockneten Elektrodenfolie auf eine standardisierte Dicke

Ziele und Motivation

Durch das Trocknen wird der noch Nass eingebrachten Elektrodenfolie ein Großteil des Lösungsmittels entzogen und somit die Elektrodenrohmasse final fest mit der Stromsammelrolle verbunden.

Energieaufwand und Kosten*

Prozessparameter & -ausprägungen

Qualitäts-spezifische Parameter	Übliche Wertekorridore	Messmethoden zur Kontrolle
Materialtemperatur (im Prozess)	30 – 180 °C in versch. Temperaturzonen	IR-Thermometer, Pyrometer
Materialtemperatur (nach dem Prozess)		IR-Thermometer, Pyrometer
Restfeuchte	< 1 g/m ²	Wirbelstromimpedanz Spektroskopie
Oberflächenqualität		Optische Bildprüfung
Ziel-Flächengewicht	± 1 Gew. %; Genauigkeit < 0,5 %	Ultraschallsystem, Röntgen/β-Strahler

Parameter der Prozessführung	Übliche Wertekorridore	Rückkopplung Qualitätsparameter
Temperaturgradient	50 - 160 °C	
Trocknungsgeschwindigkeit	> 80 m/min	
Trocknungsstrecke	> 100 m	
Folienvorspannung		
Lösungsmittelrückgewinnung	> 99,9 %	

Anforderungen an die Betriebsumgebung	Ausprägungen	Implikationen für den Prozess
Konzentration luftgeladener Teilchen	ISO 8	Sauber - bzw. Reinraum und Versorgung mit entsprechender Filtertechnik
Feuchtigkeitsgehalt der Luft in Betriebsumgebung	Materialien haben unterschiedliche Anforderungen an die Luftfeuchte (z.B. Ni-reiche Kathoden sensibel, Graphit unkritische)	

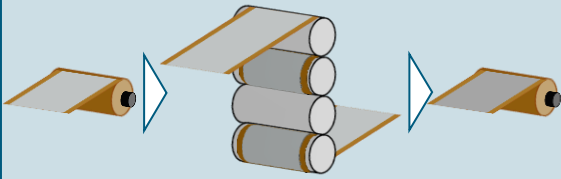
Herausforderungen

- Elektrodenintegrität:** Temperatur/-gradienten müssen exakt gewählt und genau eingehalten werden, um die strukturelle Integrität und Homogenität der Elektrodenfolie zu erhalten.
- Homogenität:** Unterschiedliche Restfeuchtigkeit innerhalb einer Elektrodenbahn kann die Homogenität folgender Prozesse beeinflussen.
- Gaseinschlüsse:** Die Bildung von Hohlräumen durch das Verdampfen von flüssigem Lösungsmittel müssen verhindert werden, um das Abbröckeln von Aktivmaterial zu verhindern.
- Energiemanagement:** Thermisches Trocknen der Elektroden erfordert eine signifikante Energiezufuhr, welche aktiv überwacht und dessen thermischer Energieverlust minimiert werden muss.
- Abgase:** Gasförmige organische Lösungsmittel entstehen bei der Kathodentrocknung und müssen aufgefangen, sicher abgeleitet und im Idealfall zurückgewonnen werden.

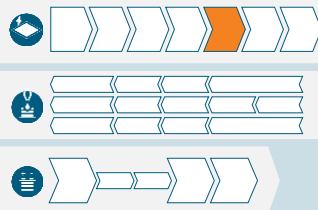
F&E Wissensträger

„Verdichtung und Vereinheitlichung der Elektrodenfolie“

Übersicht



Fertigungskette

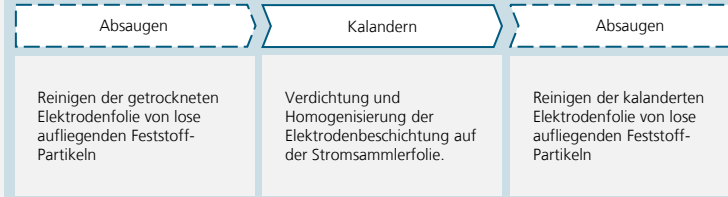


Prozessbeschreibung

Trocknen:

Graduiertes trocknen der beschichteten Elektrodenfolie zur Entfernung des Großteils der flüssigen Bestandteile der aufgetragenen Elektrodenpaste.

Kalandern:



Slitting:

Zuschneiden der Elektrodenfolie der Mutter-Rolle in zellspezifisch dimensionierte Tochter-Rollen.

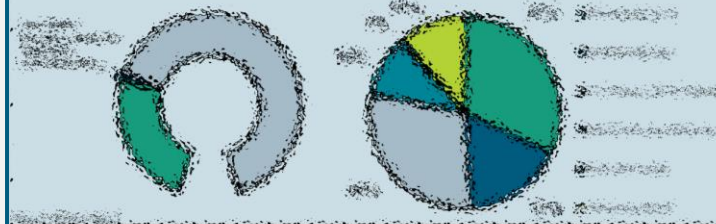
Ziele und Motivation

Beim Kalandern wird die getrocknete Elektroden-Folie durch mehrere Walzrollen hindurch geführt, um die Elektrode zu verdichten und Unebenheiten der Elektrodenoberfläche aus vorhergehenden Prozessen zu homogenisieren, um eine gleichmäßige Performance der Elektrode zu ermöglichen.

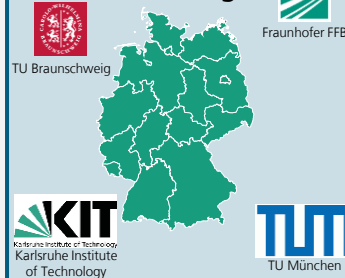
Herausforderungen

- **Druck:** Der aufgetragene Druck der Kalanderrollen und der Abstand zwischen den Rollen muss kontinuierlich gleichbleibend gehalten und überwacht werden. (Vermeidung: Inhomogenitäten der Porosität und Kathodenhöhe)
- **Temperatur:** Temperierte Kalanderrollen müssen eine konstante, variabel einstellbare, Temperatur auf der gesamten Rollenoberfläche über den kompletten Prozesszeitraum halten, für ein homogenes Prozessergebnis.
- **Durchsatz:** Trotz veränderlicher Geschwindigkeit der durchgeleiteten Elektrodenfolie, darf die Elastizität der Materialien nicht zu Ungenauigkeiten oder Veränderungen im Prozessergebnis führen.
- **Qualitätskontrolle:** Die Qualitätskontrolle vor, nach und während dem Prozess müssen auch bei hohen Geschwindigkeiten (100 m min⁻¹) für ein konsistentes Endprodukt sorgen.
- **Verschleißfestigkeit/Verschmutzung:** Jegliche Kontamination der Kalanderrollen muss vermieden werden, um signifikanten Schaden und Inhomogenitäten an allen zukünftigen Elektrodenfolien zu verhindern.
- **Beständigkeit:** Schleichender Verschleiß der Kalanderrollen sollte vermieden werden oder im nicht vermeidbaren Fall, kontrollierbar und ohne Einfluss auf das Prozessergebnis sein.
- **Flexibilität:** Unterschiedliche Elektrodenbeladungen (Dicke der Elektroden) und Materialien sollten mit den gleichen Kalandern prozessiert werden können.
- **Ersatz:** Kalanderrollen sollten schnell und problemlos ohne zeitlich signifikanten Einfluss auf die Produktion austauschbar sein. Aufwändige Neukalibrierung der Kalanderrollen sollten vermieden werden.

Energieaufwand und Kosten*



F&E Wissensträger



Prozessparameter & -ausprägungen

Qualitätsspezifische Parameter



Qualitätsparameter des Prozessproduktes	Übliche Wertekorridore	Messmethoden zur Kontrolle
Schichtdicke	< 200 µm (einseitig);	Toleranzen: < 1-2 % der Zielschichtdicke
Schichtdicke / -Porosität	20-50 %	Lasertriangulation, kapazitiver Sensor, konfokaler Wegsensor
Materialbrüche		Optische Bildprüfung
Gewichtsverteilung		
Porengrößenverteilung		Optische Bildprüfung

Prozessspezifische Parameter



Parameter der Prozessführung	Übliche Wertekorridore	Rückkopplung Qualitätsparameter
Durchlaufgeschwindigkeit	60-100 m/min	
Konstanz des Liniendrucks	< 2500 N/mm	
Temperierung der Kalanderrollen (Breite)	50-250 °C	Toleranz der Temperaturverteilung: 1 °C
Bahnzug an Ab- und Aufwickler	50-300 N	
Wiederholgenauigkeit Spalteinstellung	± 2 µm	
Oberflächenrauhigkeit	Ra < 0,02 µm; Rmax < 0,025 µm	

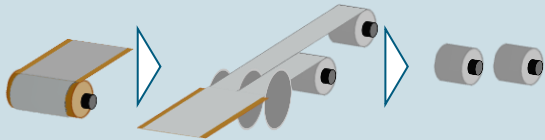
Betriebsumgebung



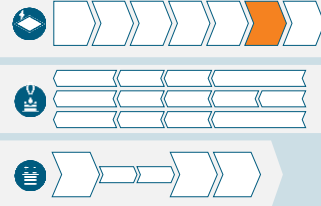
Anforderungen an die Betriebsumgebung	Ausprägungen	Implikationen für den Prozess
Konzentration luftgeladener Teilchen	ISO 8	Sauber- bzw. Reinraum und Versorgung mit entsprechender Filtertechnik
Feuchtigkeitsgehalt der Luft in Betriebsumgebung	Materialien haben unterschiedliche Anforderungen an die Luftfeuchte (z.B. Ni-reiche Kathoden sensibel, Graphit unkritisch)	Trockenraumtechnik z.T. noch nicht erforderlich

„Zerteilung der Mutter-Rolle in zellspezifisch große Tochter-Rollen“

Übersicht



Fertigungskette

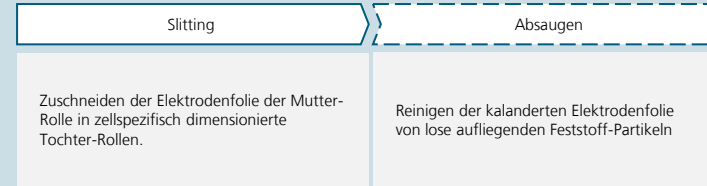


Prozessbeschreibung

Kalandern:

Verdichtung und Homogenisierung der Elektrodenbeschichtung auf der Stromsammelrolle.

Slitting:



Vakuumtrocken:

Finale Austrocknen der Lösungsmittel aus dem Beschichtungsprozess unter Vakuum Bedingungen und erhöhter Temperatur.

Ziele und Motivation

Der Slitting-Prozess stellt den Beginn des Übergangs von der Elektrodenfertigung zur Zellemblierung da. In diesem Schritt der Batteriefertigung werden die vorab gefertigte Elektroden-Mutter-Rollen auf zellspezifisch breite geschnitten und als Tochter-Rollen aufgerollt.

Herausforderungen

- **Saubere Schnitte:** Bei Geschwindigkeiten von bis zu 100 m min⁻¹ muss ein sauberer Schnitt der Elektroden-Mutter-Roller gewährleistet und ein Verlust an Aktivmaterial zu vermeiden werden.
- **Saubere Schnitt-Grate/gerade Schnitte:** Ungerade oder eingerissene Elektrodenränder müssen um jeden Fall verhindert werden, um eine erfolgreiche Zell-Assemblierung zu ermöglichen und potentielle Kurzschlüsse zu verhindern.
- **Verschleißfestigkeit/Verschmutzung:** Jeglicher Verschleiß und jede Verschmutzung der Schneidwerkzeuge muss vermieden werden, um signifikanten Schaden und Inhomogenitäten an allen zukünftigen Elektrodenfolien zu verhindern.
- **Flexibilität der Materialien:** Unterschiedliche Elektrodenbeladungen (Dicke der Elektroden) und Materialeien sollten mit dem gleichen Schneidwerkzeug prozessiert werden können.
- **Flexibilität der Schnitte:** Um eine Vielzahl an verschiedenen Zellformaten und Größen bedienen zu können, sollte die Schnittbreite variabel einstellbar sein.
- **Ersatz:** Potentiell verschlissene oder beschädigte Kalanderrollen sollten schnell und problemlos ohne zeitlich signifikanten Einfluss auf die Produktion austauschbar sein. Aufwändige Neukalibrierung der Kalandersollten vermieden werden.
- **Innovationsbeständigkeit:** Neue Physische Slitting-Maschinen (Messer) sollten einen potentiellen Wechsel der Technologie hin zu Laser-Cutting ermöglichen.

Energieaufwand und Kosten*



F&E Wissensträger



Prozessparameter & -ausprägungen

Qualitätsspezifische Parameter



Qualitätsparameter des Prozessproduktes	Übliche Wertekorridore	Messmethoden zur Kontrolle
Gratqualität		Hochauflösende Matrixkamera
Materialbrüche		Optische Bildprüfung
Freiheit von Verunreinigungen		Optische Bildprüfung

Prozessspezifische Parameter



Parameter der Prozessführung	Übliche Wertekorridore	Rückkopplung Qualitätsparameter
Schnittgeschwindigkeit	< 150 m/min	
Schnittbreitentoleranz	± 150 – 250 µm	
Absauger-Unterdruck		
Bahnzug an Ab- und Aufwickler	25-300 N	
Positioniergenauigkeit zur Schneidzone	± 0,3 mm	

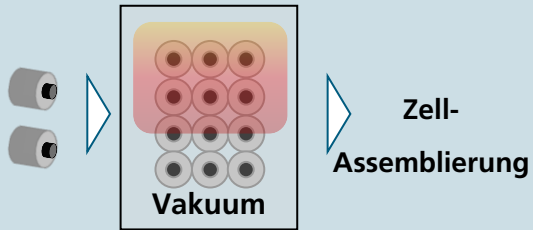
Betriebsumgebung



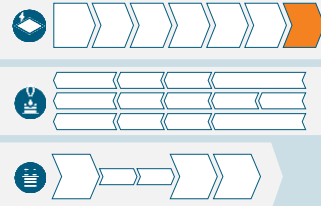
Anforderungen an die Betriebsumgebung	Ausprägungen	Implikationen für den Prozess
Konzentration luftgeladener Teilchen	ISO 8	Sauber- bzw. Reinraum und Versorgung mit entsprechender Filtertechnik
Feuchtigkeitsgehalt der Luft in Betriebsumgebung	Materialien haben unterschiedliche Anforderungen an die Luftfeuchte (z.B. Ni-reiche Kathoden sensibel, Graphit unkritisch)	Trockenraumtechnik z.T. noch nicht erforderlich

„Finales trocknen der Elektrodenfolie zur Entfernung von Lösungsmittelresten“

Übersicht



Fertigungskette



Prozessbeschreibung

Slitting:

Zuschneiden der Elektrodenfolie der Mutter-Rolle in zellspezifisch dimensionierte Tochter-Rollen.

Vakuumtrocknen:

Sammlung

Dosierung

Sammlung einer Definierten Zahl an geschnittenen Tochter-Elektroden-Rollen zu einem Batch, welches anschließend komplett in einen Vakuum-Trockenofen transferiert wird.

Finales Austrocknen der Lösungsmittel aus dem Beschichtungsprozess unter Vakuum Bedingungen und erhöhter Temperatur.

Assemblierung:

Kombination der gefertigten Elektrodenfolie mit Separator-Folie zum finalen Zell-Stapel, gefolgt von der Zellverpackung und anschließender Elektrolytbefüllung.

Ziele und Motivation

Im letzten Schritt der Elektrodenfertigung werden diese final getrocknet, um jegliches Potential für eine Beeinträchtigung der Zellperformance durch rückständiges Lösungsmittel zu vermeiden. Hierfür werden mehrere Tochter-Elektroden-Rollen gesammelt und gemeinsam in einem Vakuumschrank bei vermindertem Druck und erhöhter Temperatur getrocknet.

Herausforderungen

- **Elektrodenintegrität:** Temperatur/-gradienten müssen exakt gewählt und genau eingehalten werden, um die strukturelle Integrität und Homogenität der Elektroden-schichten und deren Oberflächen zu erhalten.
- **Homogenität:** Unterschiedliche Restfeuchtigkeit innerhalb einer Elektrodenbahn kann die Performance der Finalen Batteriezelle negativ beeinflussen.
- **Gaseinschlüsse:** Die Bildung von Hohlräumen durch das Verdampfen von flüssigem Lösungsmittel müssen verhindert werden, um das Abbröckeln von Aktivmaterial zu verhindern.
- **Energiemanagement:** Thermisches Trocknen der Elektroden erfordert eine signifikante Energiezufuhr, welche aktiv überwacht und dessen thermischer Energieverlust minimiert werden muss.
- **Abgase:** Gasförmige organische Lösungsmittel entstehen bei der Kathodentrocknung und müssen aufgefangen, sicher abgeleitet und im Idealfall zurückgewonnen werden.

Energieaufwand und Kosten*



F&E Wissensträger

TU Braunschweig

Fraunhofer FFB

KIT
Karlsruhe Institute of Technology

Prozessparameter & -ausprägungen

Qualitätsspezifische Parameter

Qualitätsparameter des Prozessproduktes	Übliche Wertekorridore	Messmethoden zur Kontrolle
Restfeuchte	< 200 ppm	Gravimetrische Methoden, Calciumhydrid-Verfahren
Oberflächentemperatur		Pyrometer

Prozessspezifische Parameter

Parameter der Prozessführung	Übliche Wertekorridore	Rückkopplung Qualitätsparameter
Arbeitsdruck-Fenster	< 0,1-1000 mbar	Genauigkeit: ± 0,01 mbar
Zielvakuum	0,01 mbar	
Maximaltemperatur	max 200 °C	
Typische Trocknungstemperatur	120 °C (Anode); 150 °C (Kathode)	Genauigkeit: ± 1°C
Trocknungsdauer	8 – 24 h	
Kapazität	2-4 Coils gleichzeitig	

Betriebsumgebung

Anforderungen an die Betriebsumgebung	Ausprägungen	Implikationen für den Prozess
Konzentration luftgeladener Teilchen	ISO 8	Sauber- bzw. Reinraum und Versorgung mit entsprechender Filtertechnik
Feuchtigkeitsgehalt der Luft in Betriebsumgebung	Materialien haben unterschiedliche Anforderungen an die Luftfeuchte (z.B. Ni-reiche Kathoden sensibel, Graphit unkritisch)	Trockenraumtechnik z.T. noch nicht erforderlich