

Industrialisierungskonzept für die Trockenbeschichtung von Batteriekathoden

ProLIT

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt

CustomCells

 **DAIKIN**

IBU | tec



BLB⁺
iPAT

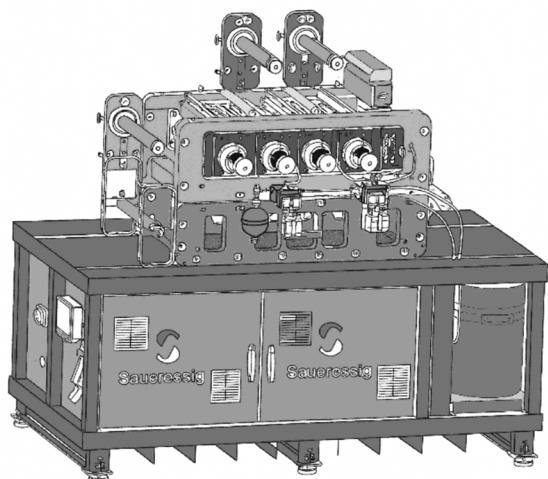
 Universität
Münster



 **EIRICH**



 **Matthews™
Engineering**  **SAUERESSIG®**



Inhalt

Einführung	4
Trockenbeschichtungsprozess	5
Gigafactories.....	6
Zellformat & -eigenschaften für eine Anlagen-Jahresleistung von 1 GWh	7
Anlagenkonzept	8
1. ROHSTOFFHANDLING	9
2. FESTSTOFFDOSIERUNG IN EIN MISCHSYSTEM	11
3. MISCHSYSTEME UND FUNKTIONALISIERUNG DES PULVERGEMISCHS	12
4. MATERIALÜBERFÜHRUNG AUF MATERIAL- AUFGABESEITEN/PULVERDOSIERUNG	13
5. PULVERDOSIERUNG IN DEN KALANDERSPALT	14
6. SCHICHTBILDUNG IM MEHRWALZENKALANDER.....	15
7. RÜCKFÜHRUNG DES (RAND-)SCHNITTS.....	17
Qualitätskontrolle (in-line / on-line)	18
Industrierelevante Forschungsergebnisse	19
Energie- & Ökobilanzierung.....	24
Personalbedarf	27
Fazit & Perspektive	28
Referenzen.....	29
Autoren.....	31
Impressum	32

Einführung

Die rasante Entwicklung der Batterietechnologie und der steigende Bedarf an leistungsfähigen Energiespeichern stellen Industrie, Forschung und Gesellschaft vor Herausforderungen. Insbesondere der Herstellungsprozess von Batterieelektroden rückt in den Fokus, da sie maßgeblichen die Leistungsfähigkeit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit von Batterien beeinflussen und somit entscheidend für die Elektromobilität und weitere Anwendungen in der Energiewende sind.

Die Trockenbeschichtung als ein innovativer Elektrodenherstellungsprozess verzichtet im Vergleich zu konventionellen Prozessen auf den Einsatz von Lösungsmitteln und ermöglicht dadurch eine deutliche Reduzierung des Energieverbrauchs in der Produktion. Zudem entfallen aufwändige Trocknungsprozesse sowie die Notwendigkeit der Lösungsmittelrückgewinnung und -entsorgung, was sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile bietet. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Prozess- und Materialentwicklung von Lithium-Ionen-Batteriekathoden für die großtechnische Trockenbeschichtung“ (*ProLiT*) wurde daher an der Trockenbeschichtung für Lithium-Ionen-Batteriekathoden geforscht und ein Konzept für ihre Industrialisierung entwickelt.

Das Projekt vereint ein breites Konsortium aus Industrie und Wissenschaft, welches alle erforderlichen Kompetenzen für eine ganzheitliche Betrachtung und Entwicklung der kalanderspaltbasierten Trockenbeschichtung abdeckt [1]. Zu den Partnern zählen **Materialhersteller**, *Daikin Chemicals* (PTFE-Binderentwicklung) und *IBU-tec* (LFP-Kathodenaktivmaterialentwicklung), **Universitäten**, *Technische Universität Braunschweig* mit dem *Institut für*

Partikeltechnik (Verfahrens- und Anlagenentwicklung (Batch-Mischer, Kalander), Skalierung) und *Universität Münster* mit dem *Institut Münster Electrochemical Energy Technology* (Rezepturentwicklung im Labormaßstab (Batch-Mischer), elektrochemische Analysen in mehrlagigen Pouchzellen), **Maschinen- und Anlagenbauer**, *Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG* (*Eirich-Mischer*, Entwicklung, beratend), *Coperion K-Tron (Schweiz) GmbH* (Dosiertechnik, Entwicklung) und *Matthews International Saueressig Engineering* (*Kalander, Anlagenentwicklung*) und der **Zellhersteller** *CustomCells* (Verfahrensentwicklung (Extrusion), elektrochemische Analysen in Pouchzellen) sowie ein OEM mit Zellkompetenz.

Ziel war es, durch einen Hybridansatz aus Material-, Prozess- und Anlagenentwicklung skalierbare und wettbewerbsfähige Prozesse zu realisieren. Die Entwicklung erfolgte in enger Zusammenarbeit des Konsortiums, wobei die Bewertung des kalanderspaltbasierten Trockenbeschichtungsprozesses für Batterieelektroden (Dry Battery Electrode (DBE)) stets im Vergleich zu lösungsmittelbasierten Referenzprozessen erfolgte und Aspekte wie Produktqualität, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit berücksichtigt wurden.

Für die Skalierung des kalanderspaltbasierten Trockenbeschichtungsprozesses wurde ein Konzept für eine industrielle Produktionslinie mit einer Kapazität von 1 GWh entwickelt, welches nachfolgend präsentiert wird. Dieses Konzept basierte auf den im *ProLiT*-Projekt gewonnenen Erkenntnissen und adressiert die Zellformate Pouch- und Rundzelle.

Im Mittelpunkt stehen dabei die Verarbeitungsschritte für gängige Kathodenmaterialien wie LFP und NMC. Beginnend beim Materialhandling über das Mischen der Ausgangsstoffe bis hin zur Schicht- und Elektrodenbildung im Kalander wurden alle relevanten Prozessschritte analysiert und hinsichtlich

ihrer Effizienz und Nachhaltigkeit bewertet. Ergänzend wurden übergreifende Aspekte wie die Energiebilanz, der Personalbedarf und Wartung der Anlagen beleuchtet.

Da Batteriefabriken üblicherweise auf die Produktion von Zellen definierter Größe und mit mehreren GWh-Jahresleistung ausgelegt werden, erfolgt die Realisierung großer Produktionskapazitäten in modularen GWh-Blöcken. Innerhalb dieser Blöcke sind die Anlagen in ihrer Leistung begrenzt, sodass die Blöcke wiederum in Linien unterteilt und parallel installiert werden. Viele am Markt verfügbaren Produktionsmaschinen erreichen eine Produktionsleistung von rund 1 GWh. Daher wurde die Betrachtung im ProLiT-Projekt auf diese praxisnahe Größenordnung fokussiert, um realistische und direkt anwendbare Erkenntnisse für die industrielle Umsetzung der Trockenbeschichtung zu gewinnen.

Trockenbeschichtungsprozess

Der Trockenbeschichtungsprozess (Abbildung 1) für Elektroden beginnt mit dem Mischen und der Funktionalisierung von Aktivmaterial, leitfähigen Additiven und einem speziell geeigneten Binder wie PTFE. Aufgrund seiner Eigenschaft, unter Scherung und Temperatur Fibrillen auszubilden, kann PTFE-Partikel des Aktivmaterials und der Leitadditive vernetzen, indem die Partikel über Van-der-Waals-Kräfte an das von den Fibrillen gebildete Netzwerk angebunden werden. Nach der

Fibrillierung des Binders im Mischprozess wird die Pulvermischung in den Kalanderspalt kontrolliert dosiert, um bei der Filmbildung eine gleichmäßige Schichtdicke und Flächenbeladung zu erhalten. Im Kalander wird das Pulver im initialen „Pulver-zu-Film“-Schritt im ersten Spaltdurchgang durch Scherung und Temperatur des Kalanderwalzenpaars zu einem Film geformt. Mit dem Kalandrierprozess geht eine weitere Fibrillierung des PTFE-Binders und intensivere Vernetzung der Elektrodenkomponenten einher. Um eine bestimmte Schichtdicke und Flächenbeladung zu erhalten, kann die initial geformte Schicht zwischen mehreren Walzenpaaren weiter gescherzt und die Schichtdicke reduziert werden. Anschließend wird der ausgeformte Film an den Rändern in Abhängigkeit des Zellformats geschnitten und auf einen Stromableiter zwischen einem Walzenpaar auflaminiert, um die Batterieelektrode herzustellen.

Entsprechende Prozesse und Maschinenkonzepte wurden beispielsweise von *Maxwell Technologies* [2] und dem *Fraunhofer IWS (DryTraec®)* [3] vorgeschlagen. Anlagentechnisch kann eine Trennung des Filmbildungs- und Laminationsprozesses erfolgen oder beide Prozesse in einer Maschine umgesetzt werden. Aktuell existiert jedoch kein standardisierter Prozess oder allgemein bevorzugte Anzahl an Kalanderwalzen.

Trotz ihrer Vorteile bringen Trockenbeschichtungsprozesse auch spezifische Herausforderungen mit sich. Besonders anspruchsvoll ist die feine und

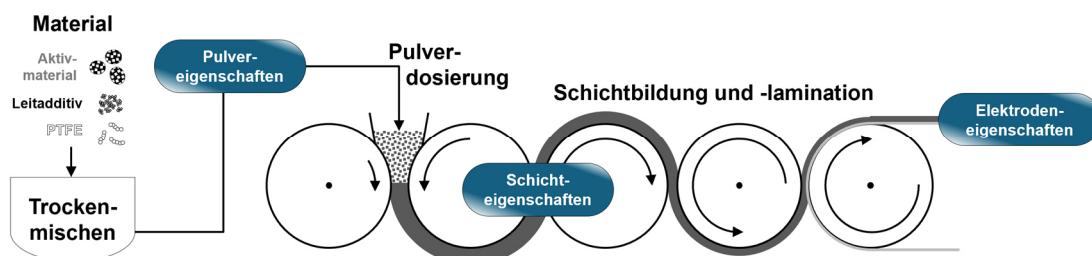


Abbildung 1: Allgemeine Prozesskette der kalanderspaltbasierten Trockenbeschichtung (erstellt von M. Nickl)

gleichmäßige Verteilung des Binders im Pulvermischgut, was bei stark kohäsiven und faserartigen Bindern wie PTFE besonderes herausfordernd ist. Zudem verlangt die exakte Dosierung der Elektrodenmischung in den Kalanderwalzenspalt und die anschließende Verdichtung des Pulvers zu einer stabilen Elektrodenbeschichtung eine sorgfältige Prozesssteuerung, um eine über die Breite, Länge und Dicke homogene Elektrode, eine zuverlässige Haftung auf dem Stromableiter sowie auch eine optimale Porenstruktur innerhalb der Elektrode sicherzustellen.

Das im *ProLiT*-Projekt untersuchte Verfahren nutzt PTFE als Binder, um durch dessen Fibrillierung eine homogene Verteilung und ein stabiles Netzwerk in der Elektrodenmischung zu erreichen. Zur Herstellung der Kathoden für mehrlagige Zellen wurde ein Mehrwalzenkalander (>8 Walzen) eingesetzt, welcher die Schichtherstellung und Lamination auf der Stromableiterfolie vereint. Eine Besonderheit im *ProLiT*-Projekt ist zudem die neu entwickelte Dosiertechnik, die kontrolliert und kontinuierlich die Elektrodenmischung in den Kalanderspalt fördert.

Gigafactories

Basis für die nachfolgenden Überlegungen ist eine Produktionsliniengröße mit einer Jahreskapazität von 1 GWh. Hinterfragt wurde, welche Materialmengen für diese Kapazität verarbeitet werden müssen und welche Maschinengrößen den industriellen Projektpartnern hierfür zur Verfügung stehen. Bei der Auswahl der Maschinentechnik zeigen sich dabei zwei zentrale Herausforderungen: Einerseits existieren bei den verfügbaren Maschinen Baugrößensprünge, so dass bei Einsatz bestimmter Modelle auch deutlich höhere Durchsätze, teils ein Vielfaches der für 1 GWh benötigten Leistung, realisiert werden können. Die nächstkleinere Baugröße wäre jedoch zu klein, um die geforderte Durchsatzleistung zu

realisieren, oder mit nahezu 100 % Auslastung ohne Reserve zu nah an der oberen Leistungsgrenze. Andererseits sind einzelne Maschinenkonzepte durch ihre maximale Leistungsfähigkeit begrenzt, wodurch größere Durchsätze nicht immer in noch größeren Maschinen realisiert werden können. In solchen Fällen ist es erforderlich, mehrere Maschinen dieser maximal verfügbaren Baugröße parallel zu betreiben.

Ein möglicher Ansatz besteht darin, Einzellinien mit definierter Leistung auszulegen, bei denen für jeden Prozessschritt jeweils eine Maschine installiert wird. Die Maschine mit der geringsten Leistungsfähigkeit bestimmt dabei die Gesamtleistung der Linie. Dieses Konzept bietet hohe Flexibilität für das Scale-up und Erweiterungen, da sich die gewünschte Anlagenkapazität durch das parallele Anordnen mehrerer Einzellinien einfacher anpassen lässt. Allerdings kann diese Lösung, insbesondere bei sehr großen Kapazitäten, zu einem hohen Platzbedarf und steigenden Investitionskosten führen. Alternativ können in den einzelnen Prozessschritten jeweils wirtschaftlich optimierte Maschinengrößen eingesetzt werden, sodass die Anzahl der parallel betriebenen Maschinen pro Prozessschritt variiert. Dies erfordert jedoch eine sorgfältige Planung der Materialflüsse und eine entsprechende Auslegung der Anlagenlogistik.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus einer 1 GWh-Linie lassen sich grundsätzlich auf größere Produktionsblöcke, wie bspw. 10 GWh, übertragen. Voraussetzung dafür ist, dass die erforderlichen Durchsatzleistungen (z.B. in kg/h bzw. m/min) sowie die jeweiligen Zellformate und Maschinenparameter bekannt sind. Auf dieser Basis können die Produktionskapazitäten durch Multiplikation entsprechend skaliert werden.

Zellformat & -eigenschaften für eine Anlagen-Jahresleistung von 1 GWh

Zelleigenschaften und Formate

Für die grundsätzlichen Betrachtungen wurden zwei NMC-basierte Zellformate, eine 4695 Rundzelle mit ca. 30 Ah, einem Durchmesser von 46 mm und einer Höhe von 95 mm sowie eine Pouchzelle mit ca. 90 Ah (350×100×68 mm) herangezogen. In Abbildung 2 sind diese schematisch dargestellt.

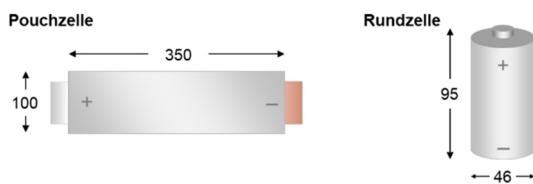


Abbildung 2: Zellformate Pouchzelle und Rundzelle

Im Rahmen des Projekts wurden sowohl NMC- als auch LFP-Kathoden untersucht, während Graphit-Anoden nur am Rande betrachtet wurden. Die Referenzrezepturen der Kathoden sind nachfolgend in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Kathodenrezepturen

Kathode	Aktivmaterial / %	Leitruß / %	Binder (PTFE) / %
NMC	97	1,5	1,5
LFP	97	1,5	1,5

Anlagendurchsatz für eine Jahresproduktion von 1 GWh

Um die erforderlichen Durchsatzleistungen der Anlage zu berechnen, wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Elektroden- und Zellparameter als Randbedingungen definiert. Für eine vergleichbare Bewertung von NMC- und LFP-Kathoden wurde eine einheitliche Flächenkapazität von ~4 mAh/cm² festgelegt. Aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Kapazitäten von NMC und LFP ergeben sich zwangsläufig unterschiedliche Elektrodendicken.

Tabelle 2: Eigenschaften der NMC- u. LFP-Kathode

Parameter	Einheit	Aktivmaterial	
		NMC	LFP
Spezifische Kapazität	mAh/g	~200	~150
Flächenkapazität	mAh _{AM} /cm ²	~4	~4
Flächengewicht	mg _{AM} /cm ²	~23	~28
Spannung	V	3,8	3,3
Dichte	g/cm ³	~3,2	~1,9
Dicke	µm	~73	~150

Für eine Jahresproduktion von 1 GWh ergibt sich bei einer angenommenen Betriebszeit von 350 Tagen/Jahr und 24/7-Betrieb der in Tabelle 3 angegebene Materialverbrauch und Durchsatz.

Tabelle 3: Materialverbrauch und Durchsatz für 1GWh/a Produktion von NMC- und LFP-Kathoden

Parameter	Einheit	Aktivmaterial	Ruß	Binder (PTFE)
NMC- Kathode				
Materialverbrauch	t/a	~1300	~20	~20
Durchsatz	kg/h	~160	~2,5	~2,5
LFP-Kathode				
Materialverbrauch	t/a	~1800	~30	~30
Durchsatz	kg/h	~220	~3,5	~3,5

Der Anteil des Rezyklates aus dem Schichtbildungsprozess im Mehrwalzenkalander, wie beispielsweise abgetrennte Randstreifen, kann gemeinsam mit dem frischen PTFE der Aktivmaterial-Leitruß-Mischung während des Mischprozesses zugeführt werden. Bei den in ProLiT angewendeten Zellformaten fallen bei Pouchzellen schätzungsweise 5,7 % und bei Rundzellen rund 8 % des Rezyklates an. Hinzu kommen Verluste durch das An- und Abfahren des Kalanders, die etwa auf 5 % geschätzt werden, sowie das Grobgut aus der Schutzsiebung zwischen Pufferbehälter und Dosierer. Daraus ergibt sich eine potenzielle maximale Rückführungsquote von bis zu 15 %, was einer Erhöhung des Materialdurchsatzes im Mischer von 160 kg/h auf 189 kg/h am Beispiel von

NMC entspricht. An der Dosierung, am Mischer oder am Kalander auftretende und in Filtern abgeschiedene Emissionen hingegen werden nicht recycelt, da deren Zusammensetzung unbekannt ist und sie vermutlich überwiegend aus feineren Anteilen wie Kohlenstoff bestehen. Dieses Material wird verworfen. Aufgrund der positiven Erfahrungswerte wird insgesamt eine nahezu vollständige Materialausnutzung angenommen, was die Wirtschaftlichkeit steigert.



Abbildung 3: Blick in eine moderne Produktionsumgebung für Batteriematerialien in einer Gigafactory; das Foto zeigt Prozess-Equipment und Automatisierungstechnik und wurde bereitgestellt von der Firma Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG.

Anlagenkonzept

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem ProLiT-Projekt sowie den diskutierten Randbedingungen wurde die nachfolgende Anlage konzipiert. Es sieht die Integration eines Doppelschneckenextruders oder eines Batch-Mischers (hier: Eirich-Mischer) vor. Ergänzt wird dieses Konzept durch die erforderliche Peripherie für Lagerung und Dosierung der Rohstoffe (sowie des Recyclingmaterials). Darüber hinaus werden der Transport, die Zwischenlagerung und die Dosierung der fibrillierten Mischung für die Weiterverarbeitung in einem Mehrwalzenkalander berücksichtigt. In Abbildung 4 ist das Anlagenkonzept schematisch dargestellt.

Im Nachfolgenden wird das Anlagenkonzept im Detail beschrieben. Es besteht grundsätzlich aus:

- 1. Rohstoffhandling:** Rohstoffaufgabe für Einsatzstoffe und Recyclingmaterial mit Zwischensilos.
- 2. Feststoffdosierung** in ein Mischsystem.
- 3. Mischsystem** (Extruder oder Batch-Mischer (hier: Eirich-Mischer)) **und** die dort stattfindende **Funktionalisierung des Pulvergemisches.**
- 4. Materialüberführung in Zwischensilos** mit Schutzsiebung im Austrag auf Materialaufgabeseiten/ Pulverdosierung.
- 5. Pulverdosierung in den Kalander-spalt** über die geforderte Walzen-spaltbreite.
- 6. Schichtbildung im Mehrwalzenkalander.**
- 7. Rückführung/ Recycling von Randschnitt** am Kalander sowie Grobgut aus der Schutzsiebung in den Mischprozess.
- 8. Fertige beidseitig beschichtete Elektrode**

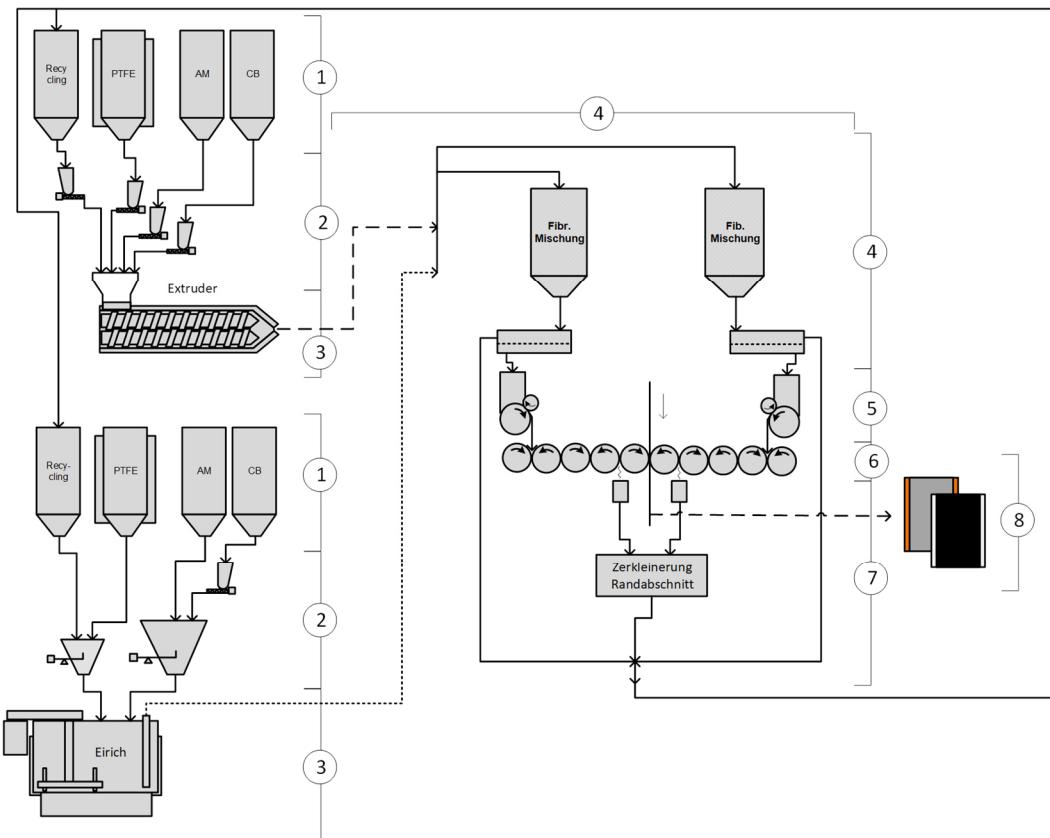


Abbildung 4: Anlagenkonzepte für Extruder und Batch-Mischer (hier: Eirich-Mischer) des Trockenbeschichtungsprozesses aus dem ProLit-Projekt (erstellt von S. Gerl)

1. ROHSTOFFHANDLING

AKTIVMATERIAL – NMC und LFP

Das pulverförmige Aktivmaterial (AM) wird üblicherweise in Großgebinde (BigBags) mit verschweißten Aluminium-Inlinern und einem Fassungsvermögen von etwa 500 kg angeliefert. Die Entleerung erfolgt manuell über BigBag-Stationen in füllstandsüberwachten Puffersilos, deren Volumen mindestens das 1,5-fache eines BigBags beträgt.

Industrierelevante NMC-Kathodenmaterialien mit erhöhtem Nickelgehalt, insbesondere ab NMC811, besitzen eine ausgeprägte Feuchtigkeitssensitivität. Um eine vorzeitige Alterung während der Zwischenlagerung und Verarbeitung zu verhindern, ist es essenziell, den Kontakt mit Umgebungsfeuchtigkeit so weit

wie möglich zu minimieren. Anstelle eines Trockenraumes könnte ein Micro-Environment energetisch und ökonomisch sinnvoll sein. Aufgrund der Karzinogenität des NMC sollte an der Aufgabestation ein Containment (OEB3/OEB4), z.B. durch staubdichte Andockung mit zusätzlicher Einhausung (bspw. GloveBox,) angestrebt werden.

Im Gegensatz zu NMC-Kathodenmaterialien tritt bei LFP-Kathodenmaterialien durch Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse kein signifikanter Kapazitätsverlust auf, sodass bei Kontakt mit Umgebungsluft weder merkliche Kapazitätsverluste noch eine vorzeitige Alterung zu erwarten sind. Jedoch ist LFP hygroskopisch, was zu einem kohäsiven Verhalten in der Handhabung führen

kann, was somit Einfluss auf die Weiterverarbeitung hat und eine Nachtrocknung des Materials erforderlich machen kann. Zudem reagiert LFP mit UV-Strahlung, weshalb es in BigBags mit Aluminium-Inlinern gelagert wird, die einen zuverlässigen Schutz vor Lichteinfall bieten. Gleichzeitig verhindern Aluminium-Inliner das Eindringen von Feuchtigkeit während der Lagerung, wodurch Agglomeration vermieden wird, welche die Handhabung und Verarbeitung erschweren können. Ein Micro-Environment kann auch für LFP aus energetischer und ökonomischer Sicht eine sinnvolle Alternative zum klassischen Trockenraum darstellen. Allerdings sollte kritisch geprüft werden, ob der Einsatz eines Micro-Environments angesichts der sehr kurzen Verweilzeiten im Puffersilo und der zügigen Verarbeitung tatsächlich erforderlich ist. Da LFP nicht als Gefahrstoff eingestuft wird, kann die BigBag-Station im Vergleich zu NMC technisch deutlich einfacher gestaltet werden. Dies reduziert die Anforderungen an Sicherheitsvorkehrungen und ermöglicht eine unkomplizierte Handhabung beim Entleeren und Dosieren des Materials.

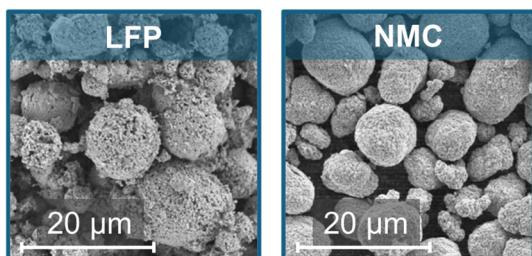


Abbildung 5: REM-Aufnahmen des polykristallinen LFP- und NMC-Rohmaterials

LEITADDITIV - RUSS

Leitruße werden aufgrund ihrer niedrigen Schüttdichte von 30 bis 60 g/l in vakuumverpackten Papiersäcken mit einem Inhalt von 5 bis 10 kg geliefert. Aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche ($50\text{--}2000 \text{ m}^2/\text{g}$) nimmt Leitruß leicht Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. Daher empfiehlt es sich, sowohl bei der Sackentleerung als auch bei der Lagerung im Puffersilo ein Micro-

Environment einzusetzen, um den Kontakt mit Luftfeuchtigkeit zu minimieren und die Materialeigenschaften zu erhalten. Aufgrund der niedrigen Schüttdichte ($0,08\text{--}0,16 \text{ g/cm}^3$) und des zu dosierenden Schüttvolumens sind die Nachfüllzyklen besonders zu berücksichtigen.



Abbildung 6: REM-Aufnahme einer Ruß-Art

In der konventionellen und industriellen Elektrodenherstellung (mittels Nassfilmbeschichtung) kommen vermehrt Kohlenstofffasern (engl. carbon nano tubes (CNT) oder fibers (CNF)) zum Einsatz, welche die elektrische Elektrodenleitfähigkeit und somit deren Leistungsfähigkeit erhöhen. Die Handhabung der CNTs und CNFs sind jedoch aufgrund ihrer Biopersistenz mit hohen Sicherheitsmaßnahmen verbunden und wurden im ProLiT-Projekt nicht angewendet.

BINDER – PTFE

Das PTFE liegt als grobes Pulver vor und wird derzeit in 25-kg-Trommeln geliefert, die, anders als bei PVDF üblich, keinen Inlay-Plastiksack enthalten. Dadurch ist das Material nicht direkt entnehmbar und muss entweder an einer Sackaufgabestation ausgeschaufelt oder mithilfe spezieller Fass-Entleerungsstationen für Trommeln verarbeitet werden. Größere Gebinde, z.B. 100 kg Trommeln, sind zur Handhabung von PTFE ungeeignet, da das Material am Boden durch sein Eigengewicht und seine hohe Duktilität stark verdichtet werden kann. Bezuglich Luftfeuchtigkeit sind bei PTFE keine besonderen Maßnahmen erforderlich, da es nicht hygrokopisch ist. Daher kann das Material offen in eine Aufgabestation mit Eintragsklappe eingebracht werden. Beim Umfüllen

besteht das Risiko elektrostatischer Aufladung, weshalb geeignete Schutzmaßnahmen getroffen werden müssen. Dazu zählen geerdete Aufgabestationen und Werkzeuge, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Die Eigenschaften und die Handhabung von PTFE sind stark temperaturabhängig. Temperaturen oberhalb von ~ 20 °C können bspw. bereits im Dosierprozess des PTFE-Rohstoffs zur Fibrillierung führen. Die entstehenden Agglomerate des verdichteten PTFEs können den Mischprozess und die nachfolgende Schichtbildung negativ beeinflussen. Daher sollte bei Lagerung und Transport die Kühlkette nicht unterbrochen werden und unter 20 °C liegen, um eine Materialveränderung zu vermeiden. Für die Rohstoff-Dosierung haben sich Materialtemperaturen im Bereich von 0 °C bis 10 °C bewährt. Da PTFE eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, müssen die Gebinde nach dem Transport genügend lange kühl gelagert werden, um sicher zu

stellen, dass das Material durchgekühlt ist. Am einfachsten ist es, einen Kühlraum für die Lagerung, die Materialaufgabe, das Puffersilo sowie den Dosierer vorzusehen. Da eine Agglomeration des PTFE durch Transport und Lagerung in den Trommeln auftreten kann, erfordert dies eine Siebung/Dispergierung bei der Aufgabe in das Silo. Um eine unerwünschte Verdichtung des PTFE, und damit Austragsprobleme im Puffersilo zu vermeiden, sollte dieses nicht mehr Platz als ein bis zwei Gebindefüllungen bieten. Für den Materialaustrag werden eher Vibrationsdosierer als Schnecken-dosierer verwendet, da diese das Material schonend dosieren und Verklumpungen vermieden werden können.

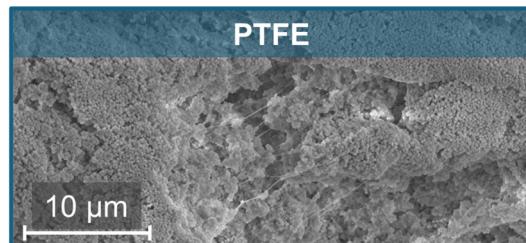


Abbildung 7: REM-Aufnahme einer PTFE-Art

2. FESTSTOFFDOSIERUNG IN EIN MISCHSYSTEM

Bei einem kontinuierlich arbeitenden **Extruder** werden die einzelnen Rezepturbestandteile synchron über jeweils fest zugeordnete Dosierstellen dem Mischprozess zugeführt. Dabei ist es wichtig, hochpräzise Dosierer mit geringen zeitabhängigen Schwankungen der einzelnen Feststoffmassenströme einzusetzen, um die Rezeptur zuverlässig innerhalb der vorgegebenen Toleranzen zu halten. Stand der Technik sind gravimetrische Dosiersysteme, welche die Gewichtsabnahme des Vorlagebehälters kontinuierlich erfassen und auf dieser Basis den Massenstrom berechnen und regeln. Bei einem **Batch-Mischer** (hier: *Eirich*-Mischer) wird der Rohstoff

in Wägebehälter gemäß Rezeptur eingewogen und anschließend dem Mischer zugeführt. Durch die batchweise Verwiegung der Rezeptur spielen Schwankungen im Massenstrom während des Dosievorgangs keine Rolle. Für die Genauigkeit der Rezeptur ist ausschließlich die dosierte Gesamtmenge entscheidend, nicht jedoch ein konstanter Austrag. Dies senkt die Anforderungen an die Dosierung und die erzielte Genauigkeit der Rezeptur ist einfacher zu kontrollieren. Auch kann so die Dosierung der nächsten Charge bereits während des Mischzyklus der im Mischer befindlichen Charge erfolgen, so dass sich die Befüllzeiten des Mixers deutlich verkürzen.

3. MISCHSYSTEME UND FUNKTIONALISIERUNG DES PULVERGEMISCHS

Das allgemeine Ziel des Mischprozesses ist es, die homogene Verteilung der Elektrodenkomponenten zu erreichen, die stark agglomeriert vorliegenden Leitadditive (typischerweise Leitruß und vermehrt auch CNTs) ausreichend gut zu dispergieren und den PTFE-Binder optimal für den nachfolgenden Trockenbeschichtungsprozess zu fibrillieren.

EXTRUDER

Der Extruder stellt ein hochflexibles Mischsystem dar, das sich für unterschiedliche Rezepturen und Betriebsweisen konfigurieren lässt. Im vorliegenden Anlagenkonzept wird jedem Bestandteil der Rezeptur ein eigener Dosierer zugeordnet, wodurch sowohl die gemeinsame Zuführung der Edukte über einen zentralen Trichter als auch die dosierte Zufuhr an unterschiedlichen Positionen entlang des Extruders ermöglicht wird. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Vormischungen im gewünschten Verhältnis zu erzeugen und zuzuführen. Die variablen Dosierstellen, die Schneckenkonfiguration sowie die gezielte Temperierung einzelner Extrudergehäuse erlauben eine optimale Anpassung des Prozesses an die jeweiligen Anforderungen der Trockenbeschichtung.

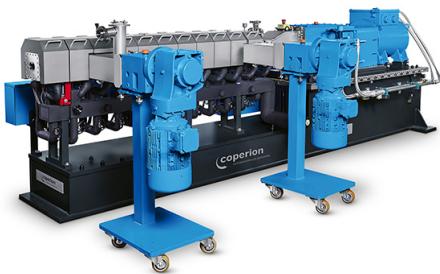


Abbildung 8: Doppelschneckenextruder von der Firma Coperion GmbH

Zu Beginn des Verfahrensteils im Extruder erfolgt die Dispergierung der Rohstoffe, insbesondere des Leitadditivs und PTFEs. Die PTFE-Fibrillierung findet im mittleren Verfahrensteil bei erhöhter

Temperatur und Scherung statt. Im Extruder wird die PTFE-Fibrillierung durch Auswahl einer geeigneten Schneckenkonfiguration und angepasster Prozessparameter (z.B. Drehzahl und Temperatur) erreicht. Im letzten Drittel des Verfahrensteils wird das Produkt abgekühlt und die entstandenen Agglomerate werden mittels entsprechender Schneckeelemente (z.B. gezahnte Mischelemente) zerkleinert. Ist die Zerkleinerung der entstandenen, makroskopischen Agglomerate der fibrillierten Pulvermischung nicht ausreichend für die Folgeprozesse Dosierung und Filmbildung, so kann eine Nachzerkleinerung in einer Mühle oder einem Mischer erfolgen. Etwaigem, durch Scherbeanspruchung und abrasive Produkte verursachtem, lokalen Verschleiß an Schneckeelementen und im Gehäuse kann mittels geeigneter Werkstoffe entgegengewirkt werden.

Da im Vergleich zur Suspensionsherstellung von nassherstellten Elektroden bei Produkten für trockenherstellte Elektroden bislang keine inline- oder online-Messverfahren zur Qualitätskontrolle existieren, müssen materialspezifische Dosierschwankungsgrenzen definiert werden, außerhalb derer eine Produktausschleusung erforderlich ist.

Für die Anwendung in einer 1 GWh Anlage kann ein 58 mm Extruder zum Einsatz kommen. Mit diesem Extruder ist gemäß Herstellerangaben der erforderliche Durchsatz von 165 kg/h und mehr möglich.

BATCH-MISCHER

Durch den batchweisen Betrieb des bspw. Eirich-Mischers kann der PTFE-Binder zusammen mit dem Aktivmaterial und den Leitadditiven in den Mischer zugegeben und aufbereitet

werden. Vorteilhafter hat sich jedoch ein zweistufiger Mischprozess herausgestellt, in welchem zunächst das Aktivmaterial und die Leitadditive, insb. Leitruß, dispergiert werden und anschließend das PTFE hinzugefügt wird. Der zweistufige Mischprozess, welcher im ProLiT-Projekt entwickelt wurde, wird im Abschnitt „wissenschaftliche Erkenntnisse“ näher erläutert.

Da während des Mischens in der Regel die Materialtemperatur erhöht wird, sollte der Batch-Mischer über eine Kühlmöglichkeit verfügen, um nach dem Fibrillieren die Mischung zu kühlen, die Agglomerate zu zerkleinern und währenddessen die Temperatur auf unter 35 °C zu senken. Die Temperatur am Ende des Mischprozesses sollte idealerweise zwischen 30 °C und 35 °C liegen, da höhere Temperaturen bei PTFE zu unerwünschten Phasenänderungen führen können.

Aufgrund der Stoßkräfte der Partikel an Werkzeug und Behälter kann es zu hohem Verschleiß kommen, insbesondere bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten des Mischwerkzeugs. Da beim Eirich-Mischer zwischen Mischgut und Behälter keine wesentliche Relativgeschwindigkeit auftritt, anders als bei Batch-Mischern mit stationären Behältern, ist der Verschleiß am

Behälter verhältnismäßig gering. Das hoch beanspruchte Mischwerkzeug wird zur Vermeidung von übermäßigem Metallabrieb hochverschleißfest ausgeführt.

Für die Anwendung in einer 1 GWh Anlage würde eine 500 L Maschine zum Einsatz kommen, welche bei einer Füllung von 500 bis 600 kg NMC-Mischung eine zur Verfügung stehende Zykluszeit von bis 3 bis 3,5 h bei einer geforderten Mischleistung von 165 kg/h hätte. Praktisch liegt die Chargenzzeit durch eine verlängerte Kühlzeit wegen des degressiven Wachstums der Wärmeaus tauschfläche gegenüber kleineren Labor- und Pilotmaschinen bei etwa 60 bis 90 min, so dass ca. 2,5 bis 3,5 GWh Durchsatzleistung pro Maschine möglich wären. Die Wartungsintervalle in Bezug auf den Austausch von Verschleißteilen am Mischwerkzeug werden auf 3 bis 6 Monate eingeschätzt.



Abbildung 9: Eirich-Mischer von der Firma Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG

4. MATERIALÜBERFÜHRUNG AUF MATERIAL-AUFGABESEITEN/PULVERDOSIERUNG

Am Ende des Mischvorgangs wird das Mischgut zur Auftrags- bzw. Dosiereinrichtung des Mehrwalzenkalanders überführt. Dies erfolgt bevorzugt mittels pneumatischer Förderung. Da die im Anlagenkonzept (s. Abbildung 4) vorgesehenen Auftrags- bzw. Dosiereinrichtungen an den beiden Kopfenden des

Kalanders nur sehr kleine Speichervolumina besitzen, ist ein regelmäßiges Nachfüllen erforderlich, um einen kontinuierlichen unterbrechungsfreien Materialstrom in den Kalanderspalt sicherzustellen. Das am Extruder kontinuierlich oder im Batch-Mischer in größeren Chargen erzeugte Mischgut wird in einem der

Dosiereinrichtung vorgeschalteten Puffersilo zwischengelagert. Damit werden die vor- und nachgelagerten Prozesse zeitlich entkoppelt. Dieses Puffersilo muss im Fall der Beschickung über einen Batch-Mischer mindestens das halbe Batch-Volumen aufnehmen können, da der Kalander über zwei Materialaufgabeenden für die beiden Seiten der Batterieelektrode verfügt und eine Charge entsprechend über beide Enden aufgeteilt wird. Bei einem Extruder kann das Puffersilo auch kleiner gewählt werden. Je größer das Silo, desto mehr neigt das vorfibrillierte Mischgut durch sein Eigengewicht zur Bildung von Agglomeraten. Austragshilfen wie Rührwerke oder

Fluidisierung können eingesetzt werden, um einen zuverlässigen Austrag aus dem Silo sicherzustellen. Am Siloaustrag bzw. bei der Aufgabe in den Dosierer sind größere Agglomerate zwingend zu vermeiden, da diese die Dosierbarkeit und den Kalanderalzenverschleiß negativ beeinflussen. So ist die Größe der Agglomerate auf vorzugsweise kleiner 500 µm jedoch maximal 1000 µm zu begrenzen. Daher empfiehlt es sich, bei beiden Mischarten (Extruder, Batch-Mischer) eine Schutzsiebung zwischen Silo und Dosierer zu installieren.

5. PULVERDOSIERUNG IN DEN KALANDERSPALT

Die Anforderungen an eine Dosierung des fibrillierten Mischguts in den Kalanderalzenspalt sind herausfordernd. Zum einen ist das im Mischer vorfibrillierte Material häufig nicht frei fließend und muss aufgrund seiner Agglomerationsneigung schonend prozessiert werden. Weiter ist das Material gleichmäßig über die Walzenbreite und mit einem konstanten Füllgrad zu verteilen, da unterschiedliche Füllgrade im Kalanderspalt einen Einfluss auf das Beschichtungsergebnis (Schichtdicke, Flächengewicht) haben. Damit wird deutlich, dass der Dosiergenauigkeit eine große Bedeutung zukommt. Die erforderliche Genauigkeit ist dabei eng zwischen Elektrodenhersteller sowie den Maschinenbauern von Kalander und Dosierer abzustimmen.

Da diese Kombination aus Anforderungen nicht durch das Standardportfolio von Coperion K-Tron abgedeckt werden konnte, wurde im Rahmen des *ProLiT*-Projektes ein neues Dosierkonzept erarbeitet. Der dabei entwickelte Rollendo-

sierer (s. Abbildung 10) besitzt zwei gleichsinnig laufende, in der Drehzahl synchronisierte Rollen. Die Dosierrolle besitzt Kavitäten und durch ihre Rotation wird das vorfibrillierte Material ausgetragen. Die zweite kleinere Rolle streift das überschüssige Material oberhalb der Kavitäten ab, welches den Spalt am Austrag nicht passieren kann und reduziert damit ein Kompaktieren des druckempfindlichen Materials im Austragsspalt. Der Rollendosierer steht auf einer Waage, um die Gewichtsabnahme zu messen und Abweichungen im Massenstrom schnell durch Drehzahländerung zu korrigieren. Eine genaue und kontinuierliche Dosierung ermöglicht es, die Materialvorlage im Kalanderspalt zu minimieren. Dadurch lassen sich z.B. dünne Schichten bereits nach dem ersten Kalanderspalt herstellen und die finale Schichtdicke kann z.T. mit weniger Kalandierschritten erzielt werden. Zur Füllstandregelung kann die Höhe der Materialvorlage im Kalanderspalt erfasst und durch einen weiteren Regelkreis

konstant gehalten werden. Die Dosieraufgabe (Breite, Durchsatz) ist sowohl für Pouchzellen als auch für Rundzellen realistisch umsetzbar, da in beiden Fällen eine gleichförmige Dosierung über die gesamte Spaltweite erforderlich ist und ein Beschnitt erst nach der Filmbildung erfolgt. Im Rahmen des Projektes konnten im Zusammenspiel von Rollendosierer und Kalander bei einer Dosierrate von 20 kg/h Genauigkeiten von besser als 0,5 bis 1 % erzielt werden. Dies bezieht sich sowohl auf die Dosierrate des Rollendosierers als auch auf die Varianz der Filmdicke über die Film breite und Filmlänge.

Der Vorlagebehälter ist unter Beachtung einer maximalen Anzahl an Nachfüllvorgängen so klein wie möglich zu wählen, um eine genaue gravimetrische Regelung zu gewährleisten. Die Nachfüllung wird mit einem Vibrations- oder Schnekkendosierer in Abhängigkeit der Materialeigenschaften realisiert. Der Schnekkendosierer ist bei schwierig zu dosierenden Produkten vorzuziehen, soll jedoch so konfiguriert werden, dass das Material möglichst lose und mit minimalem Druck gefördert wird, um Verklumpungen zu vermeiden. Eine Nachfüllzeit von wenigen Sekunden ist anzustreben und der Vordosierer dementsprechend zu dimensionieren. Ein Leerfahren des

Coperion K-Tron-Dosierers ist möglich, indem der Kalander-Aufgabespalt geöffnet wird, so dass das Material nach unten durchfallen kann und unterhalb der Walzen abgesaugt und zurückgeführt wird.

Die Materialtemperatur ist bei Anwendung von PTFE-Bindern vor dem Dosieren zwingend unter 30 °C zu halten, da sich die PTFE-Struktur sonst verändert und die Mischung kohäsiver wird. Weiter hat sich gezeigt, dass kühleres Material besser dosiert werden kann. Für höhere Kalandriergeschwindigkeiten ist wärmeres Material besser geeignet. Daher kann es sinnvoll sein, das Material beim Herunterfallen zwischen Dosierer und Kalander mittels Infrarotstrahler zu erwärmen. Insgesamt sind geringe Fallhöhen des Pulvers/Granulats anzustreben.



Abbildung 10: Rollendosierer von der Firma Coperion K-Tron

6. SCHICHTBILDUNG IM MEHRWALZENKALANDER

Ein (Mehrwalzen)kalander kann flexibel betrieben werden und ermöglicht im vorliegenden Konzept eine beidseitige Elektrodenbeschichtung zur Verwendung in Zellen. Die Materialaufgabe erfolgt dabei im ersten und letzten Walzenspalt, sodass der durch mehrere Kalanderspalte prozessierte Film in der Kalandermitte auf eine mit Kohlenstoff beschichtete Stromableiterfolie lami-

niert werden kann. Eine mehrstufige Verdichtung zur Herstellung einseitig beschichteter Elektroden ist ebenso möglich. Im ProLiT-Projekt kam zunächst ein Vierwalzenkalander zum Einsatz, wobei sich zeigte, dass insbesondere für Kathodenmaterialien ein einzelner „Pulverzu-Film“-Schritt nicht ausreicht, um Schichtdicken unter 100 µm für Hochleistungsbatterien herzustellen. Daher

wurde zur Herstellung von mehrlagigen Zellen auf einen Mehrwalzenkalander (>8 Walzenanzahl) von Saueressig/Matthews Engineering ausgewichen.

Im ersten Kalandrierschritt wird loses, ca. 30 °C warmes Pulver unter Scherung/ Friktion (durch unterschiedlich schnell drehende Walzen) zu einem Film verarbeitet, welcher auf der ca. 100 °C heißen, schneller drehenden Walze haf tet. Durch die induzierte Scherung im Kalanderspalt wird das vorfibrillierte PTFE im Pulver (Batch-Mischer) oder Granulat (Extruder) weiter fibrilliert und ermöglicht so die Vernetzung der Partikel zur Entstehung eines Films. An schließend wird der hergestellte Film durch weitere Kalanderspalte gescherzt und somit die Schichtdicke sowie das Flächengewicht verringert. Beim Verdichten des Pulvers als auch beim Aus dünnen bestehender Filme bilden sich fransige Ränder mit weniger verdichtetem Pulver, welche abgeschnitten werden müssen, da diese im nächsten Walzenspalt zu Instabilitäten führen können. Vor der Lamination zwischen einem Walzenpaar, welches gleich schnell dreht, auf eine mit Kohlenstoff beschichtete Stromableiterfolie kann eine weitere Konfektionierung durch Randbe schnitt oder Trennung eines durchgängigen Filmes in mehrere Streifen durch Herausschneiden von Stegen notwendig sein, um das gewünschte Zellformat herzustellen. In Abbildung 2 sind die in ProLiT angenommenen Zellformate dargestellt und die Konfektionierung ihrer Kathoden in Abbildung 11 schematisch dargestellt.

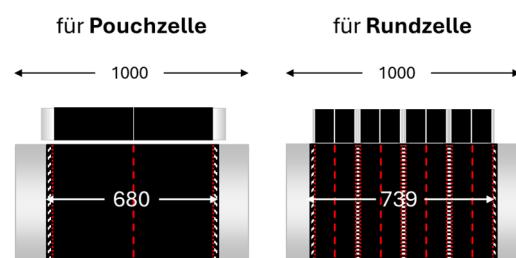


Abbildung 11: Konfektionierung des Kathodenfilms für das Pouchzelle und Rundzelle

Bei der Pouchzelle resultieren Beschich tungsbreiten von 330 mm pro Kathode. Durch die Nutzung einer 1000 mm brei ten Walze kann eine durchgängige Bahn mit 660 mm Beschichtungsbreite er zeugt und anschließend mittig geteilt werden, wodurch zwei Elektrodenbahnen für Pouchzellen entstehen. Für die 4695-Rundzelle ergeben sich deutlich schmalere Beschichtungsbreiten von ca. 85 mm je Elektrode. Bei einer Wal zenbreite von 1000 mm können vier pa rallele Bahnen mit jeweils ca. 170 mm Beschichtungsbreite gleichzeitig produ ziert und anschließend halbiert werden. Dies würde die simultane Herstellung von acht Elektrodenbahnen für Rundzel len in einem Beschichtungsvorgang er möglichen.

Es kann entweder die gesamte Breite be schichtet werden, wobei der Rand spä ter auf blanker Folie bestenfalls abgezo gen werden kann, oder es erfolgt eine vorherige Konfektionierung. Der Rand schnitt wird durch spezielle Absaugein heiten entfernt und dem Mischprozess wieder zugeführt, um Materialverluste zu minimieren. Das gleichzeitige Lamini eren beider Elektrodenseiten ist zu be vorzugen, da ein nacheinander erfolgen des Laminieren sehr anspruchsvoll ist und die Gleichheit beider Schichtseiten beeinträchtigen kann. Da jede Material variation oder ein neues Rezept individuelle Einstellungen erfordert, ist ein Ein fahren des Kalanders notwendig.

Bezüglich Wartungsarbeiten zeigt sich, dass NMC-Mischungen besonders hart und abrasiv sind, was Wartungs- und Walzentauschintervalle von etwa sechs Monaten bedingt. Mit hohen Linienlas ten verkürzt sich die mögliche Laufzeit. Abriebprobleme lassen sich durch ver chromte Walzen minimieren. Sprühbe schichtungen auf Walzen sind hingegen problematisch, da sie porös sind und zu Materialanhaltungen und Verdichtun gen führen können.

Für eine Skalierung der Produktion wird die Nutzung mehrerer Kalander gegen

über einer Verbreiterung der Walzen (>1 m) bevorzugt. Große Walzendurchmesser würden dabei höhere Liniенlasten und damit einen verbesserten Durchsatz erlauben, erhöhen jedoch die Investitions- und Wartungskosten.

Für eine Jahresproduktion von 1 GWh gilt eine Trockenbeschichtungsgeschwindigkeit von 17 bis 21 m/min als ausreichend, technisch sind Geschwindigkeiten von 50 m/min bei 100 °C und mehr

möglich. Die Anlagenaufstellung erfordert idealerweise ein ausreichend hohes Raumkonzept mit ausreichend Luftraum über dem Kalander für Auf- und Abwickelstationen der Stromableiterfolie, Pulverdosierung, Schutzsiebung und Abscheide- bzw. Vorlagesilos für die Elektrodenmischung, was die Integration in Bestandsgebäude erschwert.



Abbildung 12: Zwei- und ein Sechs-Walzenkalandersysteme von der Firma Saueressig/ Matthews Engineering

7. RÜCKFÜHRUNG DES (RAND-)SCHNITTS

Im ProLiT-Projekt war die Untersuchung des Prozessschritts zur Rückführung des (Rand)-Schnitts bzw. Rezyklates nicht vorgesehen. Jedoch ergeben sich die nachfolgenden Überlegungen für ein ganzheitliches Anlagenkonzept aus den Erkenntnissen, die aus dem Projekt gewonnen oder parallel in den Institutionen/Unternehmen im Rahmen anderer Projekte evaluiert wurden. In dem vorliegenden Anlagenkonzept werden Randschnitte und Mittelstücke freistehender Filme, die während des Schichtbildungsprozesses anfallen, abgesaugt. Dieses Material wird nicht direkt erneut

kalandriert, sondern zunächst gemeinsam mit Frischmaterial in Batch-Mischprozessen, wie dem *Eirich*-Mischer, homogenisiert. Besonders effizient ist dabei die direkte Zugabe des Rezyklates bei der PTFE-Zugabe, wodurch eine gleichmäßige Verteilung in der Mischung erreicht wird. In Extrusionsprozessen wird ebenfalls eine Beimischung von Rezyklat zum Aktivmaterial erwogen, wobei Extruder aufgrund der geringeren Werkzeuggeschwindigkeiten im Vergleich zum Batch-Mischer als weniger geeignet für die Dispergierung freistehender Film bzw. des Rezyklates gelten.

Qualitätskontrolle (in-line / on-line)

Die Sicherstellung einer konstant hohen Produktqualität erfordert den gezielten Einsatz geeigneter in-line bzw. on-line Überwachungsmethoden entlang des gesamten Elektrodenproduktionsprozesses.

a. Beschichtbarkeit der Pulvermischung

Ein direktes Messverfahren zur Bestimmung der Beschichtbarkeit von fibrillierten Pulvern oder Granulaten existiert bislang nicht. Auch speziell für die Trockenbeschichtung entwickelte Inline-Messverfahren zur Qualitätssicherung fehlen. In der Praxis werden bisher Drehmoment- und Leistungsverläufe von Mischern und Extrudern während des Mischprozesses als indirekte Qualitätsindikatoren genutzt, da sie Rückschlüsse auf die Intensität und den Abschluss des Fibrillierungs- und Mischprozesses erlauben. Als potenziell geeignetes Soft-Sensor bzw. geeignetes Inline-Messverfahren kann im Zusammenhang mit dem *Eirich*-Mischprozess dessen Mischwerkzeug als eine Art Inline-Rheometer eingesetzt werden. Um anhand rheologischer Daten den Anteil der plastischen Verformung im Komposit zu bestimmen und daraus die Verarbeitbarkeit sowie den Fibrillierungsfortschritt des Binders abzuleiten, kann ein spezieller Messablauf mit dem im Mischer befindlichen Mischgut abfahren werden, bei dem das Drehmoment bei definierten Werkzeugdrehzahlen erfasst und daraus eine Fließkurve ermittelt wird.

Eine fehlende Standardisierung des Trockenbeschichtungsprozesses erschwert die Entwicklung und Auswahl geeigneter Messverfahren erheblich.

Dennoch ermöglichen die hier beschriebenen sowie die im nächsten Abschnitt erwähnten Analysen eine gezielte Überwachung der Pulver- und Elektrodeneigenschaften, um in kontinuierlichen Prozessen eine gleichbleibend hohe Produktqualität zu gewährleisten und potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen.

b. Trockenbeschichtete Elektrode

Für die Qualitätskontrolle trockenbeschichteter Elektroden kann, wie bei der Nassbeschichtung, die Stromableiterfolie vor der Lamination auf Unebenheiten überprüft werden und es können zur Markierung von Ausschuss oder guter Elektrode QR-Codes auf die Ableiterfolie gelasert werden. Die Messgeräte zur Ermittlung der Flächenmasse über die Elektrodenbreite (nach der Lamination) sowie die optischen Messsysteme, die zur Qualitätskontrolle für nasshergestellte Elektroden entwickelt wurden, sollten auch nach einer entsprechenden Adaption genauso für trockenbeschichtete Elektroden einsetzbar sein.

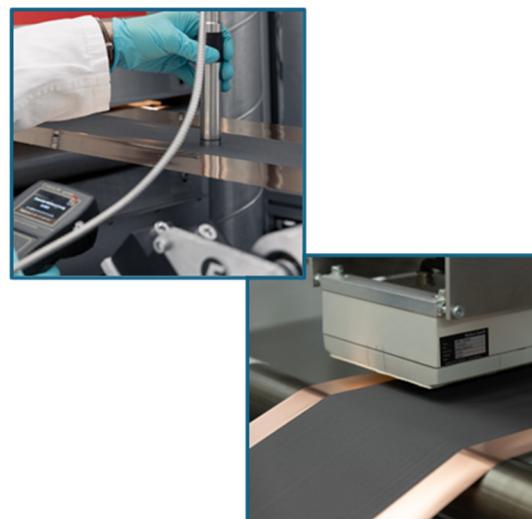


Abbildung 13: Symbolische Bilder der Qualitätskontrolle während der Elektrodenproduktion (Fotos von Marek Kruszewski/TU Braunschweig)

Industrierelevante Forschungsergebnisse

Die nachfolgenden Ausführungen fassen die wesentlichen Erkenntnisse des *ProLiT*-Projekts zusammen, die für eine industrielle Umsetzung des beschriebenen Trockenbeschichtungsprozesses von besonderer Bedeutung sind.

I. Materialien & Pulvercharakterisierungsmethoden

Analog zur etablierten Praxis in der Nassbeschichtung von Batterieelektroden ist auch für die industrielle Umsetzung der Trockenbeschichtung von Batterieelektroden der Aufbau separater Produktionslinien für Anode und Kathode empfehlenswert. Dies verhindert Querkontaminationen zwischen den unterschiedlichen Aktivmaterialarten und eliminiert zeitaufwändige Rüstvorgänge beim Wechsel der Stromableiterfolien zwischen Kupfer (Anode) und Aluminium (Kathode).

PTFE weist als Binder einzigartige Eigenschaften auf, die seine Fibrillierungsfähigkeit und damit die Elektrodeneigenschaften maßgeblich beeinflussen. Dieses Material wird bereits seit längerer Zeit für die kalanderspaltbasierte Trockenbeschichtung von Batterieelektroden verwendet. Die Fibrillierung von PTFE ist ein temperaturabhängiger Prozess und erfolgt durch Anwendung von Scherkräften, wobei die ursprünglich agglomerierten PTFE-Partikel zu langen Fibrillen umgeformt werden, die ein dreidimensionales Netzwerk zwischen den Aktivmaterialpartikeln und dem Leitadditiv bilden. Durch die Anwendung von PTFE lässt sich die Binderkonzentration bei der Trockenbeschichtung auf ca. 0.5 bis 2 % im Vergleich zur Nassbeschichtung (i.d.R. 1 bis 5 % PVDF-Binder kathodenseitig) reduzieren. Die Re-

duktion dieses Inaktivmaterials kann zu einer Steigerung der Energiedichte von Batterieelektroden führen.

Die **unterschiedlichen Aktivmaterialien** erfordern materialspezifische Anpassungen der Prozessparameter und Rezepturen, da sich ihre Partikelgröße, -dichte und -morphologie, Fließfähigkeit sowie Wechselwirkungen mit Leitadditiv und PTFE-Binder grundlegend unterscheiden [4,5]. Eine Studie [4] im Rahmen des *ProLiT*-Projekts verdeutlichte, dass die plättchenförmige Struktur von Graphit die PTFE-Fibrillierung im Vergleich zu sphärischem, hochporösem LFP im Batch-Mischprozess deutlich verlangsamt. Das im Projekt verwendete LFP zeigt aufgrund seines hohen Feinpartikelanteils und der poröseren Oberflächenstruktur eine verlängerte PTFE-Fibrillierungszeit, während sphärisches NMC durch seine höhere Partikeldichte und effizientere Verdichtungseigenschaften eine beschleunigte PTFE-Fibrillierung während des Mischprozesses bewirkte. Diese materialspezifischen Unterschiede erfordern eine präzise Abstimmung der Mischzeit und Mischnintensität als kritische Prozessparameter, wobei eine weitere Studie belegt, dass eine unzureichende Mischzeit zu unvollständiger Fibrillierung und ungleichmäßiger Materialverteilung führt, während eine exzessiv lange Mischzeit die Fragmentierung der Aktivmaterialpartikel verursachen kann. Für die prozesstechnische Handhabbarkeit und die elektrochemische Performance ist, analog zur Nassbeschichtung, die Stabilität des Aktivmaterials unter Scherbeanspruchung im Misch- und Filmbildungsprozess von Bedeutung. Die Schädigung des Aktivmaterials aufgrund hoher Scherkräfte durch hohe Mischnintensitäten führt zur Feingutbildung im Mischgut, welches

die Fibrillierung und die Homogenität der Mischung beeinflusst, sowie durch die erzeugte höhere spezifische Oberfläche zu ungewünschten Nebenreaktionen, während der Zellzyklisierung, führen kann. Eine weitere *ProLiT*-Studie hat gezeigt [6], dass größere Aktivmaterialpartikel gleicher Art intensivere Scherkräfte auf das PTFE übertragen und dadurch zu einer verstärkten PTFE-Fibrillierung führen, was in einer verbesserten Netzwerkbildung und optimierten Eigenschaften der Elektrodenschicht resultiert.

Auch die **Wahl des Leitadditivs** beeinflusst die PTFE-Fibrillierung. Eine *ProLiT*-Studie hat gezeigt, dass bei gleichem PTFE-Gehalt ein Leitruß mit geringerem Schüttgewicht, höherer spezifischer Oberfläche und höherer Ölabsorptionszahl vorteilhaftere Verarbeitungseigenschaften aufweist und aufgrund vorteilhafterer Elektrodenstrukturen zu überlegener elektrochemischer Leistung führt. Die Ursache liegt in der verbesserten Dispergierbarkeit des Rußes im Mischgut, welche die Herstellung homogener, dicker Elektrodenschichten ermöglicht, ohne dass Bindermigrationsprobleme auftreten, wie bei dicken nassbeschichteten Elektrodenbeschichtungen.

Wesentlich für einen effizienten und erfolgreichen kalanderspaltbasierten Trockenbeschichtungsprozess sind zu

identifizierende Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen, die den Einfluss der Pulvereigenschaften auf die nachfolgende Filmbildung im Kalanderspalt vorhersagbar machen. Hierzu sind **Pulvercharakterisierungsmethoden** erforderlich, die idealerweise in-line oder on-line in der Produktionsline anwendbar sind. Obwohl, wie bereits im Kapitel „Qualitätskontrolle“ erwähnt, quantifizierbare Methoden bislang nur begrenzt bekannt sind, haben sich im Rahmen des *ProLiT*-Projekts einige vielversprechende Messmethoden herausgestellt, die Korrelationen zwischen Pulver- und Film-/Elektrodeneigenschaften ermöglichen. Die uniaxiale Kompressionsmessung erwies sich als besonders wertvoll, da sie direkte Korrelationen zu Film- sowie Elektrodenporositäten zulässt [4]. Die dabei resultierenden Verdichtungsspannungen deckten materialspezifische Unterschiede auf. Eine NMC-basierte Pulvermischung erfordert höhere Verdichtungsspannungen, um die gleiche Kompressionstiefe zu erreichen, und führt bei identischer Kalandrierung zu dickeren Schichten als bspw. eine Graphit-basierte Mischung, die bereits bei niedrigen Verdichtungsspannungen auf die gleiche Dicke komprimiert werden kann. Zusätzlich konnten mittels Ringscherzellmessungen der Wandreibungswinkel an einer Wandprobe des Kalanderoberflächen-

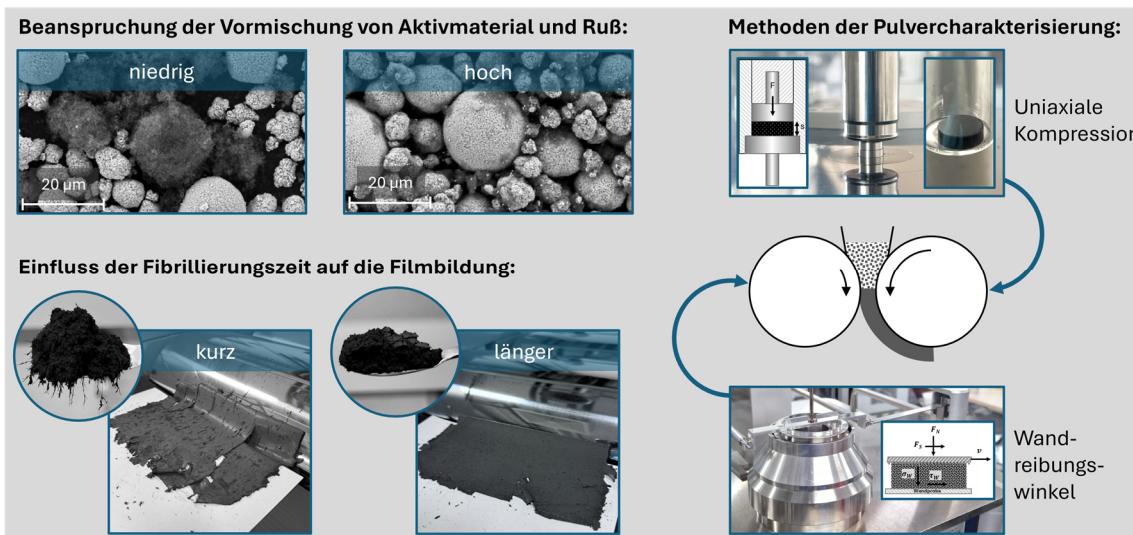


Abbildung 14: Auswahl zentraler Erkenntnisse: Einfluss der Intensität der Vormischung von Aktivmaterial und Ruß sowie der Fibrillierungszeit auf Mikrostruktur und Filmqualität von NMC-Kathoden. Beispielhaft dargestellt sind zudem angewandte Methoden zur Pulvercharakterisierung, wie die uniaxiale Kompression und der Wandreibungswinkel (erstellt von M. Nickl)

materials bestimmt werden, die direkt mit den Schichtdicken des initialen Schichtbildungsprozesses (Pulver-zu Film) korrelieren [4]. Die Messungen zeigten, dass Graphit aufgrund seines niedrigeren Wandreibungswinkels dünne Schichten bildet, während NMC durch seinen höheren Wandreibungswinkel bei der initialen Filmbildung zu dickeren Schichten neigt.

Die Fibrillendimension und -form beeinflussen sowohl die Schütteldichte als auch die Partikelgrößenverteilung des Mischguts erheblich. Die Trockenmessung der Laserbeugungsmethode zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung ist neben der Schüttedichtemessung als qualitative Bewertung des PTFE-Fibrillierungsfortschritts geeignet (Messbereich: 0,1 bis 3,5 mm) [4], ermöglicht jedoch keine quantitativen Aussagen zur genauen Fibrillengröße, da sie für sphärische Partikel konzipiert ist. Sie kann aber zudem als sinnvoller Indikator zur Beurteilung der Stabilität gebildeter Agglomerate dienen. Die im Batch-Mischprozess gebildeten PTFE-Fibrillen weisen häufig ein hohes Längen-Durchmesser-Verhältnis auf. Für dessen Bestimmung eignet sich die Trockenmessung der dynamischen Bildanalyse (Messbereich: 1 bis 34 mm). Aufgrund der Granulatgrößen von 0,1 bis 4 mm aus Extruderprozessen ist die Laserbeugungsmethode ungeeignet, während sich die dynamische Bildanalyse sowie die Siebanalyse als geeignete Messmethoden erweisen. Die Siebanalyse ist jedoch für feine Pulvermischungen aus Batch-Mischern problematisch, da sich die losen, länglichen Polymer-Fibrillen bei den

Schwingbewegungen während der Siebung verhaken und zu unkontrollierter Agglomeration neigen.

Auf Grundlage der gemessenen Pulvereigenschaften sind die Misch- und Kalandrierprozesse für jedes Aktivmaterial anzupassen bzw. zu optimieren, um bestmöglicher Elektrodeneigenschaften zu erzielen.

II. Maschinentechnik & Prozessbedingungen

Die Untersuchungen im *ProLiT*-Projekt basieren auf drei zentralen Verfahrensschritten: dem Mischprozess zur Strukturierung der Pulvermischungen, der dosierten Materialzuführung sowie der Schichtbildung mittels Mehrwalzenkalandrierung. Die Prozesskette wurde sowohl mit einem Batch-Mischer (*Eirich-Mischer*) als auch einem Extruder-Prozess untersucht.

Der im *ProLiT*-Projekt für bestimmte Aktivmaterialien und Rezepturen entwickelte **Batch-Mischprozess** im *Eirich-Mischer* folgt einem strukturierten zweistufigen Verfahrensansatz [4]. Zunächst werden Aktivmaterial und Leitadditiv bei hoher Drehzahl vorgemischt, bis in Abhängigkeit des Aktivmaterials und des Füllgrads eine Temperatur von $>70\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht wird. Eine vollständige, feindisperse Rußbedeckung des Aktivmaterials erweist sich dabei als nicht zwingend notwendig, da das PTFE, während seiner Fibrillierung, feine Partikel ($<1\mu\text{m}$) durch Van-der-Waals-Kräfte ab- und adsorbiert und im Laufe des Mischprozesses

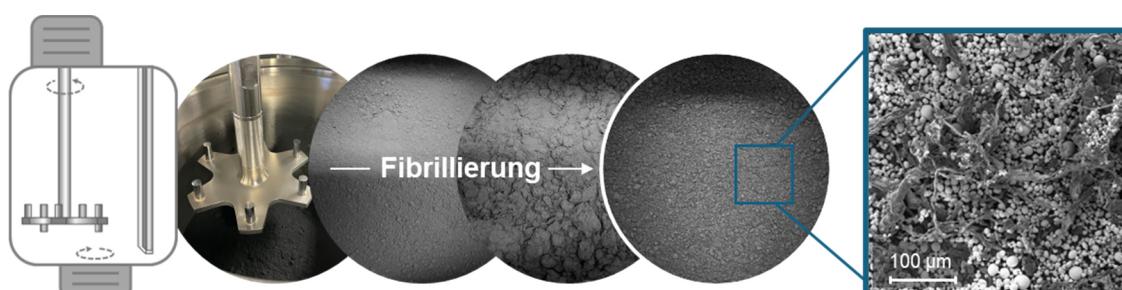


Abbildung 15: Schema eines Batch-Mischprozesses im 5L-Eirich-Mischer mit resultierender Fibrillenform (erstellt von M. Nickl)



Abbildung 16: Dargestellt sind Bilder während des Batch-Mischprozesses im 50L-Eirich-Mischer bei der Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG

oder später bei der Kalandrierung bei feinerer Fibrillenbildung freigeben kann. Entscheidend ist dabei eine ausreichende Dispergierung der Rußagglomerate. Zu geringe Umfangsgeschwindigkeiten führen zu inhomogener Rußverteilung und zu hohe Umfangsgeschwindigkeiten können Aktivmaterialpartikel schädigen. Diese Vorstrukturierungsphase gewährleistet eine homogene Verteilung beider Komponenten und die Ausbildung eines elektrisch leitenden Netzwerks. Anschließend wird der PTFE-Binder dem heißen Mischgut zugeführt und dabei homogen verteilt, ohne dabei bereits zu fibrillieren [4]. Die eigentliche Fibrillierung erfolgt über einen kurzen Zeitraum bei hoher Scherung, gefolgt von einer Kühlphase bei niedriger Drehzahl bis etwa 30 °C. Im Allgemeinen entstehen aufgrund hoher Prallbeanspruchung und geringerer Scherbeanspruchungen im Batch-Mischprozess vornehmlich Mikrofibrillen (s. Abbildung 15). Eine zu kurze Fibrillierungsdauer führt zu einer unzureichenden Fibrillenbildung, während eine zu lange Dauer eine Überfibrillierung verursacht, bei welcher degradierte und zu dünne Fibrillen entstehen, die wiederum ungünstige

Schichtbildungseigenschaften aufweisen. Ein abschließender sehr kurzer Zerkleinerungsschritt bei hoher Drehzahl stellt die gewünschte Partikelgrößenverteilung ein. Bei der Skalierung vom 1L- über 5L- bis zum 50L-Eirich-Mischer (s. Abbildung 16) waren prozessspezifische Anpassungen notwendig, da u.a. die größere Gewichtskraft des Pulvergemachs in größeren Volumina die Fibrillierung und das Aufrollen der PTFE-Fibrillen beschleunigte.

Der **Extruder-Prozess** ermöglicht eine kontinuierliche Verarbeitung unter ebenso kontrollierten Temperatur- und Scherbedingungen und kann aufgrund höherer Scherbeanspruchungen auch Nanofibrillen ausbilden (s. Abbildung 17) [7]. Für die initiale Materialdispergierung eignen sich niedrigere Temperaturen, um eine vorzeitige PTFE-Fibrillierung durch die hohe Scherbeanspruchung, die im kleinen Spalt zwischen Extruderschnecke und Gehäuseinnenraum stetig vorliegt, zu verhindern. Hierbei kommen spezielle Schneckeelemente, wie gezahnte Mischelemente, zum Einsatz, die bei geringer Beanspruchungsintensität eine optimale Materialverteilung ermöglichen. Die PTFE-

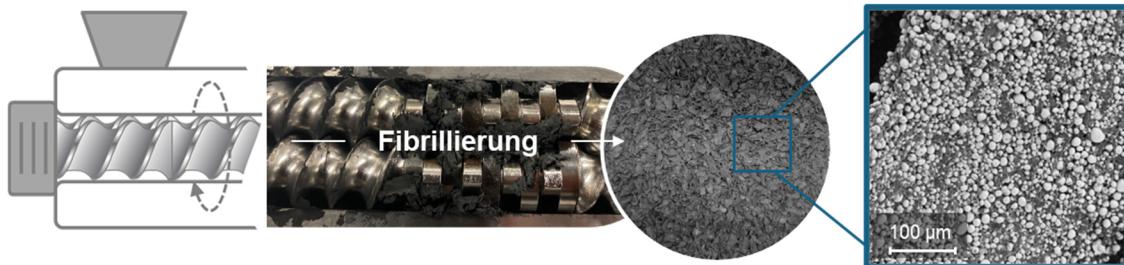


Abbildung 17: Schema eines Batch-Mischprozesses im Extruder mit resultierender Fibrillenform (erstellt von M. Nickl)



Abbildung 18: Bilder während des Dosierprozesses mit dem Rollendosierer von der Firma Coperion K-Tron sowie während des Schichtbildungs- und Laminationsprozesses mit dem ProLiT-Kalander von der Firma Saueressig/ Matthews Engineering (erstellt von M. Nickl)

Fibrillierung erfolgt im Extruder bei erhöhten Temperaturen von meist $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ durch Knetelemente, die für die erforderliche Scherbeanspruchung sorgen. Das Extrudergehäuse wird in diesem Bereich aktiv geheizt. Die entstehende knetartige Masse ermöglicht einen leichteren Energieeintrag als die initiale Pulververmischung, erfordert jedoch eine sorgfältige Abstimmung der Schneckenkonfiguration, um Überfibrillierung und Materialschädigung zu vermeiden.

Die **Dosierung** der strukturierten Pulvermischungen in den Kalanderspalt erfordert eine auf die Kohäsivität und Fließeigenschaften der PTFE-fibrillierten Pulver oder Granulate abgestimmte Fördertechnik. Es muss dabei ein „Sweet Spot“ zwischen ausreichender Fließfähigkeit und notwendiger Kohäsivität angestrebt werden. Pulver mit zu geringer Kohäsivität können gut dosiert werden, weisen jedoch für eine gute Schichtbildung eine zu geringe PTFE-Fibrillierung auf, während stark kohäsive Mischungen zwar gute Filmbildungseigenschaften besitzen, jedoch schwer dosierbar sind. Ultraschall- oder Vibrationsdosierer erwiesen sich aufgrund der kohäsiven Eigenschaften der fibrillierten Mischungen als ungeeignet, einen ausreichend gleichmäßigen Förderstrom über Zeit und Breite, insbesondere bei LFP-basierten Formulierungen, zu erreichen. Stattdessen ermöglicht der in *ProLiT*-entwickelte Rollendosierer eine präzise Zuführung optimierter Pulver über die gesamte Beschichtungsbreite und über die Zeit (s. Abbildung 18). Der dadurch kontrollierbare Füllgrad im Kalanderspalt beeinflusst dabei direkt die resultierenden Schichtdicken.

Die **Schichtbildung im Mehrwalzenkalander** (s. Abbildung 18) wird durch verschiedene Prozessparameter beeinflusst. Mit steigender Walzenanzahl und variablen Differenzgeschwindigkeiten (Friktion) der Walzen lassen sich geringere Schichtdicken und höhere Prozessgeschwindigkeiten erzielen. Bei einer Studie, in welcher der Pulver-zu-Film-Schritt beleuchtet wurde, zeigte sich, dass geringere Füllstände im Kalander-spalt initial dünner Schichten bei tendenziell gleicher Dichte erzeugen, was den Vorteil einer präzisen Dosierung verdeutlicht. Höhere Walzentemperaturen führen zur PTFE-Erweichung und ermöglichen etwas dichtere, aber vor allem dünner Schichten. Eine erhöhte Friktion (Scherung) zwischen den Walzenpaaren resultiert in dünneren Schichten bei konstanter Schichtdichte. Höhere Grundgeschwindigkeiten können zu dünneren Schichten führen, wobei in Abhängigkeit der Pulvereigenschaften hoch poröse Schüttgüter die Geschwindigkeit der initialen Filmbildung limitieren können, da luftverdrängungsbedingte Aufwirbelungen zu Löchern in der Schicht führen können.

Allgemeingültige Empfehlungen zu Prozessbedingungen sind aufgrund der starken Wechselwirkungen mit den Materialeigenschaften und individuellen Rezepturen derzeit noch nicht formulierbar und erfordern materialspezifische Optimierungsansätze.

Energie- & Ökobilanzierung

Der Energie- und Ressourcenverbrauch entlang der Prozesskette zur Herstellung von Elektroden (ohne Berücksichtigung der Materialherstellung) wurde für eine Jahresproduktionskapazität von 1 GWh berechnet. In die Analyse flossen die Verbräuche von Strom, Druckluft und Kühlwasser ein. Verglichen wurden dabei die Prozessketten der konventionellen Nassbeschichtung und der Trockenbeschichtung (Dry Battery Electrode, DBE) (siehe Abbildung 19).

Modellspezifikation & Annahmen

Die Bilanzierung der Elektrodenproduktion wurde für die beiden Aktivmaterialien NMC622 und LFP durchgeführt. Für die Trockenbeschichtung wurde eine Materialrezeptur mit den Gewichtsanteilen NMC bzw. LFP : PTFE : Leitruß = 97 : 1,5 : 1,5 % verwendet. Im Gegensatz dazu wurde für die Nassbeschichtung eine konventionelle Rezeptur mit höherem Binder- und Leitrußanteil (94 : 3 : 3) unter Verwendung von PVDF als Binder festgelegt. Die Anodenfertigung sowie die Zellmontage wurden in der Bilanzierung nicht berücksichtigt. Die zugrunde gelegten Energiemengen und Stoffströme stammen, sofern nicht anders angegeben, aus bestehender Literatur und Studien [8–10]. Die Berechnung der Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment, LCA) wurde in Brightway 2 mittels

Ecoinvent 3.11 vorgenommen. Als Produktionsstandort wurde Deutschland gewählt. Die für die Elektrodenherstellung eingesetzten Materialien stammen dabei aus global organisierten Wertschöpfungsketten. Die Emissionen aus dem deutschen Strommix wurde mit 0,380 kg CO₂-eq/kWh und für Erdgas mit 0,202 kg CO₂-eq/kWh modelliert. Die Rückführung von Ausschussmaterial wurde für NMC- und LFP-Kathoden mit einem um 15 % erhöhten Energiebedarf berücksichtigt. Für die Nassprozessierung wird ein geringerer Ausschuss von 5 % berücksichtigt, der jedoch nicht direkt wieder in den Prozess zurückgeführt werden kann. Für die Nassroute wurde die Rückgewinnung von NMP mit einer Effizienz von 99 % angenommen. Der hierfür erforderliche Energieeinsatz wurde modellseitig berücksichtigt. Bei den Materialien sind die Treibhausgasemissionen von NMC (25,9 kg CO₂-eq/kg), LFP (5,4 kg CO₂-eq/kg), PVDF (55,8 kg CO₂-eq/kg) und PTFE (120,4 kg CO₂-eq/kg [11] und 14,44 kg CO₂-eq/kg [12]) berücksichtigt.

Energie- & Ökobilanz

In der folgenden Energiebilanz werden die spezifischen Energien, wenn nicht anders angegeben als elektrische Wattstunden pro Kilogramm Beschichtung angegeben. Abbildung 20 verdeutlicht

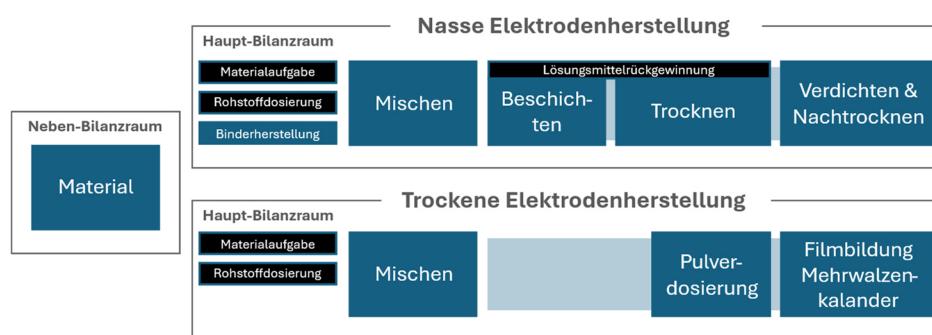


Abbildung 19: Haupt- und Nebenbilanzraum der nassen und trockenen Elektrodenherstellung

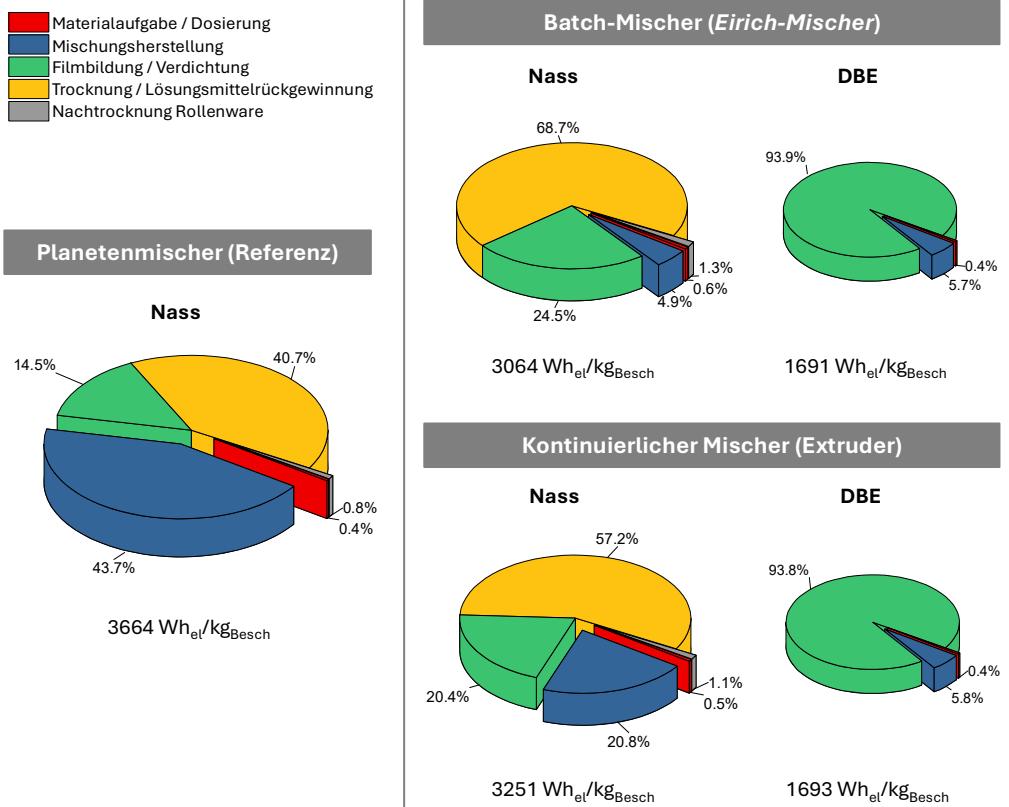


Abbildung 20: Prozentuale Energieanteile ausgewählter Prozessschritte (Materialaufgabe/Dosierung, Mischungsherstellung, Filmbildung/Verdichtung, Trocknung/Lösungsmittelrückgewinnung und Nachtrocknung) entlang der nassen und trockenen Prozesskette der Elektrodenfertigung. Der Planetenmischer wird als Referenzsystem für die konventionelle Nassprozessroute dargestellt (zur besseren Vergleichbarkeit wurden hier die thermischen Energieverbräuche unter Annahme einer Wärmequelle mit einer Leistungszahl von drei in elektrische Äquivalente umgerechnet). Für die Mischsysteme Eirich-Batch-Mischer und kontinuierlicher Mischer (Extruder) erfolgt der Vergleich beider Prozessrouten. Die spezifische Gesamtenergie wird als elektrische Wattstunden pro Kilogramm Beschichtung (Wh_{el}/kg_{Besch}) angegeben. (LCA von N. von Drachenfels)

die prozentualen Energieanteile verschiedener Prozessschritte entlang der nassen und trockenen Prozesskette bei der Herstellung von Batterieelektroden mit NMC als Kathodenaktivmaterial. Als Referenz für die Nassprozessroute dient der Planetenmischer, während beim *Eirich*-Mischer und beim Doppelschnecken-extruder jeweils beide Verfahrensvarianten abgebildet sind. Beim DBE-Prozess erfordert das Materialhandling, wie Sack- oder BigBag Entleerung sowie Dosierung, keine wesentliche Energiezufuhr im Hinblick auf den Gesamtprozess. Dadurch, dass PTFE jedoch bei 8 °C dosiert werden muss, ist eine Lagerung im Kühlsilo notwendig. Im Vergleich zur Nasselektrode ist der Energieverbrauch für das Materialhandling und die Dosierung abgesehen vom zusätzlichen Rezyklat sehr ähnlich.

Bei den durchgeführten Scale-up Versuchen im Batch-Prozess mit dem *Eirich*-

Mischer wurde ein spezifischer Energiebedarf von etwa 80 Wh/kg ermittelt, was rund dem Achtfachen des Energieeinsatzes für die Herstellung einer nassen Mischung im selben Mischer entspricht [13]. Der Extruder verbraucht für die Trockenherstellung rund 50 Wh/kg (Durchsatz ca. 160 kg/h). Im direkten Vergleich beträgt der spezifische Energieverbrauch des Planetenmischers bei der Nassherstellung etwa 250 Wh/kg, was das erhebliche Einsparpotenzial der Trockenbeschichtung eindrücklich unterstreicht [13].

Beim anschließenden Schichtbildungsprozess dominiert der Energieeinsatz des Mehrwalzenkalenders, der (inkl. Klima- und Kältetechnik) rund 400 kW benötigt. Umgerechnet auf einen Durchsatz von etwa 190 kg/h ergibt sich eine spezifische Energie von etwa 1500 Wh/kg. Im Vergleich sind die größten Energieverbraucher bei der

Nassbeschichtung die Trocknung und Lösemittelrückgewinnung. Die Trocknung beansprucht je nach Anlagenkonzept und Betriebsstrategie bis zu 14 kWh/kg, hauptsächlich gedeckt durch Gas [8,14–16]. Für die Rückgewinnung von Lösemittel per Destillation fallen etwa 130 Wh_{Gas}/kg an [17]. Weitere signifikante Beiträge liefern die Verdichtung mittels Zweiwalzenkalander (ca. 180 Wh/kg) sowie die für Nasselektroden notwendige Nachtrocknung (ca. 460 Wh_{Gas}/kg) [8,14].

Die in Abbildung 20 dargestellten Energieanteile zeigen, dass die DBE-Trockenbeschichtung mittels *Eirich*-Batchmischer den Energiebedarf bei der Kathodenproduktion gegenüber der Nassroute um rund 45 % reduziert. Für den Einsatz eines Extruders ergeben sich vergleichbare Energieverbräuche und Einsparpotenziale. In beiden DBE-Prozessrouten stellt der Kalander infolge des hohen Energieaufwands für Pressdruck und Temperierung den maßgeblichen Verbrauchsfaktor dar. Der gestiegerte Aktivmaterialanteil im DBE-Prozess führt zudem zu einer erhöhten Energiedichte der Zelle und damit zu einer zusätzlichen Reduzierung des spezifischen Energieaufwands pro Kilowattstunde Zellkapazität um etwa 2 bis 3 %.

Während die Energiebilanz signifikante Vorteile des DBE-Prozesses gegenüber konventionellen Verfahren aufzeigt, ist für eine umfassendere Bewertung der Prozessroute auch eine Betrachtung der Ökobilanz unerlässlich. In Abbildung 21 ist das Treibhausgaspotential der

Kathode, differenziert nach Material und Prozessvariante, dargestellt. Tabelle 4 veranschaulicht die relevanten Wirkungskategorien sowie die erzielten Verbesserungen, jeweils bezogen auf die Zellkapazität und getrennt nach Kathodenaktivmaterial und Prozessvariante bei der Route über den *Eirich*-Mischer.

Die aus der Ökobilanz abgeleiteten Gesamtergebnisse verdeutlichen, dass die Trockenbeschichtung im Vergleich zur konventionellen Nassbeschichtung in einer Vielzahl von Wirkungskategorien geringere Umweltauswirkungen verursacht. Das Treibhauspotential (s. Abbildung 21) aus Materialien und Produktionsprozess der Kathode reduziert sich um 8,5 % auf 41,4 kg CO₂-eq/kWh Batteriezellkapazität für NMC und um 12,8 % auf 20,4 kg CO₂-eq/kWh Batteriezellkapazität für LFP.

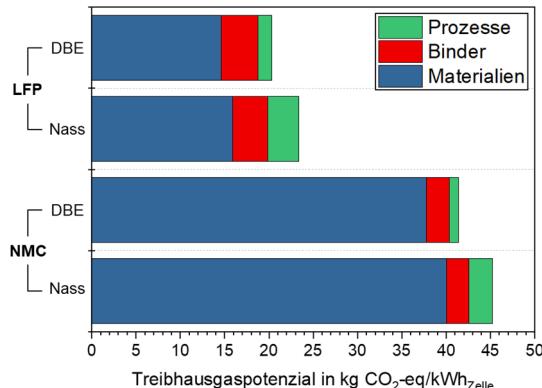


Abbildung 21: Treibhausgaspotential der Kathode in Abhängigkeit von Materialien und Produktionsvarianten bei Prozessroute über *Eirich*-Mischer (LCA von N. von Drahenfels)

Besonders hervorzuheben ist der vergleichsweise hohe Beitrag des PTFE-Binders in der DBE-Route, der auf Zellebene bei rund 3 kg CO₂-eq/kWh liegt und etwa

Tabelle 4: Wirkungskategorien je Kathodenaktivmaterial und Prozessvariante bei Prozessroute über *Eirich*-Mischer

Wirkungskategorien	Einheit	NMC			LFP		
		Nass*	DBE**	Δ	Nass*	DBE**	Δ
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -eq /kWh _{Zelle}	45,22	41,39 39,07	-8,5 % -13,6 %	23,35	20,35 16,63	-12,8 % -28,8 %
Ökotoxizität Süßwasser	kg 1,4-DCB-eq /kWh _{Zelle}	5,62	5,27	-6,2 %	1,79	1,57	-12,2 %
Humantoxizitäts-potential (Krebs)	kg 1,4-DCB-eq /kWh _{Zelle}	10,57	9,74	-7,9 %	6,88	6,10	-11,3 %
Wasserverbrauch	m ³ /kWh _{Zelle}	3,87	3,67	-5,2 %	0,26	0,22	-15,3 %
Knaptheit fossiler Ressourcen	kg Öl-eq /kWh _{Zelle}	12,53	10,77	-14,0 %	5,94	4,07	-31,6 %

* mit PVDF: 55,8 kg CO₂-eq/kg

** mit PTFE: 120,4 kg CO₂-eq/kg (ohne Auffangen der Gase) [11] | 14,4 kg CO₂-eq/kg (mit Auffangen der Gase) [12]

2 bis 4 % der gesamten CO₂-eq-Emissionen einer Zelle ausmacht. Weitere Materialien, Anodenproduktion und Zellbau machen je nach Zelldesign und Material zwischen 15 bis 25 kg CO₂-eq/kWh Batteriezellkapazität aus.

Besonders deutlich fällt der Vorteil beim Verbrauch fossiler Ressourcen (FFP) aus, die stark mit dem Energieverbrauch korreliert: Bei LFP liegt die Einsparung in der Kathode gerechnet auf kWh Batteriezellkapazität bei rund 32 %, bei NMC bei ca. 14 %. Grund dafür ist, dass beim DBE kein Erdgas mehr in der Prozesskette für die Kathodenproduktion eingesetzt wird. Auch in den weiteren betrachteten Wirkungskategorien liegen durchgehend Verbesserungen zwischen 5,3 bis 16,4 % bezogen auf die Batteriezellkapazität vor. Die Ergebnisse decken sich mit aktuellen wissenschaftlichen Studien [18,19]. Werden die Ergebnisse der Ökobilanz mit der nassen Prozessroute über den Planetenmischer statt dem *Eirich-Mischer* verglichen, vergrößern sich die Einsparpotentiale weiter um 0,5 bis 2,3 Prozentpunkte je nach Kategorie.

Zusammenfassend zeigt die Bewertung, dass die Trockenbeschichtung, unabhängig vom Zellchemietyp, ökologische Vorteile bietet. Die Ergebnisse unterstreichen somit die Relevanz der DBE-Technologie als effektive Maßnahme zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks in der Zellproduktion.

Die Umstellung des Energieträgers in der Elektrodenproduktion auf rein elektrische Energie eröffnet zukünftig weitere Potenziale zur Senkung der Treibhausgasemissionen, insbesondere bei Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen. Dies gilt aber auch für die Nassbeschichtung. Weitere Reduktionsmöglichkeiten ergeben sich durch Fortschritte in Ausschussraten, energetischer Wärmerückgewinnung und eine präzisere Ermittlung der Emissionsfaktoren von PTFE. Insgesamt bietet die Trockenbeschichtung bereits heute ein substanzielles Optimierungspotenzial für die nachhaltige Industrialisierung der Batteriezellfertigung.

Personalbedarf

Der Personalbedarf für die Herstellung von Kathoden variiert deutlich zwischen dem DBE-Verfahren und der konventionellen Nassbeschichtung. Beim DBE-Verfahren werden für das Materialhandling und den Mischer insgesamt eine Person benötigt, die sich auf 0,5 Personen für die Anlagenüberwachung in der Messwarte und 0,5 Personen für die Materiallogistik (z.B. BigBags, Säcke, Trommeln) verteilt. Im Bereich des Kalanders werden zwei Personen eingesetzt, um den Betrieb und die Überwachung der stellen. Im Vergleich dazu sieht die konventionelle Nassbeschichtung ebenfalls eine Person für Mischer und

Materiallogistik vor, benötigt jedoch zusätzlich eine Person für den Transport der Mischung vom Mischer zum Beschichter sowie für die Qualitätskontrolle. Für den Betrieb des (Tandem-)Beschichters und des Trockners sind zwei weitere Personen erforderlich, während am Kalander nur eine Person eingesetzt wird. Damit zeigt sich, dass der Personalbedarf beim DBE-Verfahren insbesondere durch den Wegfall von Transport- und Trocknungsschritten sowie die Konzentration auf den Kalanderbetrieb insgesamt effizienter gestaltet werden kann.

Fazit & Perspektive

Im *ProLiT*-Projekt wurde erfolgreich nachgewiesen, dass sich sowohl LFP- als auch NMC-Kathoden im PTFE- und kalanderspaltbasierten Trockenbeschichtungsprozess fertigen lassen, auch wenn hierfür mehrstufige Verdichtungsschritte erforderlich sind. Die daraus resultierenden wissenschaftlichen Erkenntnisse bilden die Grundlage für das entwickelte Industrialisierungskonzept, welches eine skalierbare Umsetzung der Trockenbeschichtung vorsieht. Die gewonnenen Erkenntnisse zu Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen zwischen Pulver und dem daraus resultierenden freistehenden Film bzw. der fertigen Batteriekathode sind entscheidend für die industrielle Skalierung, da sie eine zuverlässige Vorher sage von Schichteigenschaften und Prozessauswirkungen ermöglichen können. Hier besteht weiterhin ein hohes Entwicklungspotential für zukünftige In-line und Online-Qualitätskontrollsyste me, die erheblich zur Steigerung von Effizienz und Reproduzierbarkeit in der Großserienproduktion beitragen könnten. Im Vergleich zur herkömmlichen Nassbeschichtung lässt sich mit dem im Industrialisierungskonzept beschriebenen

Trockenbeschichtungsprozess ein deutlicher Energieeinsparungseffekt realisieren, wie auch andere Studien [19] belegen, was die Methode zu einem Schlüsselement für eine nachhaltige und kosteneffiziente Zellproduktion macht. Das entwickelte ganzheitliche Anlagenkonzept für die Kathodenproduktion mit integrierter Rückführung von Randschnitt in den Mischprozess stellt eine belastbare Basis für die industrielle Umsetzung dar. Wichtige Aspekte für die Weiterentwicklung, die im *ProLiT*-Projekt nicht fokussiert wurden, sind die systematische Rückführung von Produktionsabfällen wie Randschnitt, zellformat spezifischem Zuschnitt und Siebüberlauf, das Recycling trockenbeschichteter Batterieelektroden sowie die Entwicklung und Integration fortschrittlicher Prozessüberwachungssysteme. Diese Herausforderungen gilt es in zukünftigen Projekten zu adressieren, um das volle Potenzial der Trockenbeschichtung auszuschöpfen. Insgesamt zeigt das entwickelte Industrialisierungskonzept für die Trockenbeschichtung großes Potenzial, die nachhaltige und wirtschaftliche Batteriezellfertigung maßgeblich voranzutreiben.



Referenzen

- [1] Institut für Partikeltechnik, Prozess- und Materialentwicklung von Lithium-Ionen-Batteriekathoden für die großtechnische Trockenbeschichtung (ProLiT), 2025.
<https://www.tu-braunschweig.de/ipat/forschung/batterieverfahrenstechnik/aktuelle-forschungsprojekte/prolit> (accessed 12 September 2025).
- [2] P. Mitchell, X. Xi, L. Zhong, B. Zou (MAXWELL LAB [US]) US2017098826 (A1), 2016.
- [3] B. Schumm, A. Dupuy, M. Lux, C. Girsule, S. Dörfler, F. Schmidt, M. Fiedler, M. Rosner, F. Hippauf, S. Kaskel, 2025. Dry Battery Electrode Technology: From Early Concepts to Industrial Applications. *Advanced Energy Materials* 15, 2406011.
<https://doi.org/10.1002/aenm.202406011>.
- [4] M. Horst, F. Beverborg, L. Bahlmann, S. Schreiber, J. Gerk, P. Michalowski, A. Kwade, Effect of active material morphology on PTFE-fibrillation, powder characteristics and electrode properties in dry electrode coating processes, *Powder Technology* 451 (2025) 120451. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120451>.
- [5] M. Nickl, (Manuscript in revision) The Interdependence of Single Crystal Content and PTFE Fibrillation in dry-coated nickel-rich Lithium-Ion Cathodes 2025.
- [6] S. Raffenberg, (Manuscript in revision) Unveiling the impact of inherent powder properties for dry-processed lithium iron phosphate-based electrodes 2025.
- [7] K. Huber, S. Stojcevic, Y.-C. Hsieh, E.B. Müftügil, J. Terada, C. Schriever, A. Kwade, Dry battery electrode production enabled by a scalable, continuous powder mixing, *Journal of Energy Storage* 124 (2025) 116850.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116850>.
- [8] N. von Drachenfels, J. Husmann, U. Khalid, F. Cerdas, C. Herrmann, 2023. Life Cycle Assessment of the Battery Cell Production: Using a Modular Material and Energy Flow Model to Assess Product and Process Innovations. *Energy Tech* 11, 2200673. <https://doi.org/10.1002/ente.202200673>.
- [9] F. Degen, M. Schütte, Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production, *Journal of Cleaner Production* 330 (2022) 129798. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129798>.
- [10] F. Degen, M. Mitterfellner, A. Kampker, Comparative life cycle assessment of lithium-ion, sodium-ion, and solid-state battery cells for electric vehicles, *J of Industrial Ecology* 29 (2025) 113–128. <https://doi.org/10.1111/jiec.13594>.
- [11] R. Bayer, Energie - Informationsblatt CO2-Faktoren: Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss, 2023.
https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2023.html (accessed 1 November 2025).

- [12] thinkstep, Prozess-Datensatz: Folie aus Polytetrafluorethylen (PTFE) - OEKO-BAU.DAT, 2019. <https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=f281ecaf-5754-4d27-8d70-cfd18780b192&version=20.19.120> (accessed 1 November 2025).
- [13] S. Gerl, Lithium-Ionen-Batterie-Elektroden neu denken, CITplus 26 (2023) 32–34. <https://doi.org/10.1002/citp.202300916>.
- [14] F. Degen, M. Winter, D. Bendig, J. Tübke, Energy consumption of current and future production of lithium-ion and post lithium-ion battery cells, Nat Energy 8 (2023) 1284–1295. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01355-z>.
- [15] M. Schütte, F. Degen, H. Walter, Reducing Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Industrial Drying Processes in Lithium-Ion Battery Cell Production: A Qualitative Technology Benchmark, Batteries 10 (2024) 64. <https://doi.org/10.3390/batteries10020064>.
- [16] D.L. Wood, J.D. Quass, J. Li, S. Ahmed, D. Ventola, C. Daniel, Technical and economic analysis of solvent-based lithium-ion electrode drying with water and NMP, Drying Technology 36 (2018) 234–244. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1319855>.
- [17] I. Nurjanah, L.-H.C. Hsieh, Y.-H. Chiang, W.-Y. Sean, Energy saving in NMP (N-methyl-2-pyrrolidone) recovery process by numerical modeling, Environmental Technology & Innovation 31 (2023) 103218. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103218>.
- [18] M.D. Bouguern, A.K. Madikere Raghunatha Reddy, X. Li, S. Deng, H. Laryea, K. Zaghib, Engineering Dry Electrode Manufacturing for Sustainable Lithium-Ion Batteries, Batteries 10 (2024) 39. <https://doi.org/10.3390/batteries10010039>.
- [19] J. Schnell, J. Wilhelm, J. Pfeuffer, A. Ludwig, C. Baur, Building the Sustainable EV: Breakthroughs in Battery Technology and CO₂ Reduction, P3 Group GmbH. <https://www.p3-group.com/en/p3-updates/building-the-sustainable-ev-breakthroughs-in-battery-technology-and-co%e2%82%82-reduction/>.

Autoren



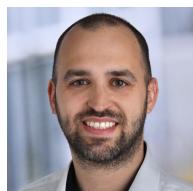
Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade
University Professor
iPAT | TU Braunschweig



Marcella Nickl
Research Associate
iPAT | TU Braunschweig



Dr.-Ing. Stefan Gerl
Head of Process Technology
Maschinenfabrik Gustav
Eirich GmbH & Co KG



Nicolas von Drachenfels
Managing Director
Battery LabFactory Braunschweig



Simon Raffenberg
Research Associate
MEET | Universität Münster



Dr. Katrin Junghans
Head of Batteryline
MEET | Universität Münster



Philipp Röring
Scientist Chemical Materials
Matthews Engineering



Dr. Ronny Schlegel
Senior Director
Research & Development
Matthews Engineering



Keith Melton
Sales Manager
Coperion K-Tron
(Schweiz) GmbH



Simon Gröninger
Manager Process
Technology – Battery
Coperion GmbH



Dr. Katja Kretschmer
Head of Cathode Material
Development Division
IBU-tec advanced materials AG



Dr. Sven Klein
R&D Leader
Advanced Battery Materials
Daikin Chemical Europe GmbH

Impressum

Dieses Whitepaper wurde herausgegeben vom *Institut für Partikeltechnik (iPAT)* im Rahmen der *Braunschweig LabFactories for Batteries and more (BLB+)*, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 19, 38106 Braunschweig. Die Universität wird vertreten durch den Leiter des Instituts für Partikeltechnik Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade. Für Rückfragen steht Ihnen dieser unter a.kwade@tu-braunschweig.de und der Geschäftsführer der BLB+, Dr.Peter Michalowski, unter p.michalowski@tu-braunschweig.de gerne zur Verfügung. Die Technische Universität Braunschweig ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts. Umsatzsteuer-Identifikationsnummer DE1523 30858. Weitere Informationen sind auf der Webseite <https://www.tu-braunschweig.de/en/blb/blb-plus/> verfügbar.

Veröffentlicht: 05.11.2025

DOI: 10.24355/dbbs.084-202510281105-0

© 2025 Die Autoren. Veröffentlicht durch BLB+ der Technischen Universität Braunschweig. Dieser Artikel ist lizenziert unter CC BY SA (sofern nicht anders angegeben).



BLB+ | Braunschweig
LabFactories for
Batteries and more

BLB⁺ Braunschweig
LabFactories for
Batteries and more

Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19 | 38106 Braunschweig

E-Mail: p.michalowski@tu-braunschweig.de
Web: www.labfactories.de

Die Autoren sind ausschließlich für den Inhalt dieser Veröffentlichung verantwortlich. Dieses Werk, einschließlich seiner Teile, ist unter CC BY SA lizenziert (sofern nicht anders angegeben).

Haftungsausschluss

Die im vorliegenden Whitepaper enthaltenen Informationen des *Instituts für Partikeltechnik (iPAT)* der *Technischen Universität Braunschweig* stammen u.a. aus ausgewählten öffentlichen Quellen. Bei der Bereitstellung dieser Informationen geht das *iPAT* davon aus, dass die verwendeten Quellen zuverlässig sind, übernimmt jedoch keine Gewähr für die Richtigkeit oder Vollständigkeit der Angaben, welche ohne vorherige Ankündigung geändert werden können. Die Inhalte und Aussagen spiegeln die aktuellen Ansichten der Autoren der jeweiligen Beiträge wider und nicht zwingend die Auffassung des *iPAT*. Das *iPAT* und seine verbundenen Institutionen schließen jegliche Haftung für Schäden, die durch die Nutzung dieses Dokuments, dessen Inhalte und/oder die Inanspruchnahme dieses Dienstes entstehen könnten, aus - soweit gesetzlich zulässig. Die Bildrechte liegen zu jeder Zeit bei den jeweiligen Urhebern.



CONTACT

Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade

University Professor

a.kwade@tu-braunschweig.de

BLB+ | Braunschweig LabFactories for Batteries and more

Technische Universität Braunschweig

Langer Kamp 19 | 38106 Braunschweig

www.labfactories.de