Maplesoft
Mathematik • Modellierung • Simulation



Wenn Web-Handling zu einem Multi-Millionen-Dollar-Problem wird – und wie MapleSim die Lösung liefert

Das Wickeln von Jelly Rolls ist der Punkt, an dem die teuersten Materialien der Batterieherstellung auf ihre anspruchsvollsten Präzisionsanforderungen treffen. In einer 10-Gigawatt-Anlage kosten Web-Handling-Fehler allein in dieser Prozessstufe schätzungsweise 49 Millionen US-Dollar jährlich während der Neuprodukteinführung (NPI). Die Grundursachen (wechselwirkende Zug-, Ausrichtungs-, Walzen- und Geschwindigkeitsdynamik) sind gut verstanden. Was bisher gefehlt hat, ist eine praktikable Methode zu deren Lösung, die nicht auf kostspieligen physischen Experimenten an laufenden Produktionsanlagen beruht.

***MapleSim for Web Converting Systems is that method** ist genau diese Methode: eine physikbasierte, systemweite Simulationsplattform, die es Batterieherstellern und Maschinenbauern ermöglicht, die Wickeldynamik zu modellieren, vorherzusagen und zu optimieren, bevor Hardware angepasst oder Material verbraucht wird.*

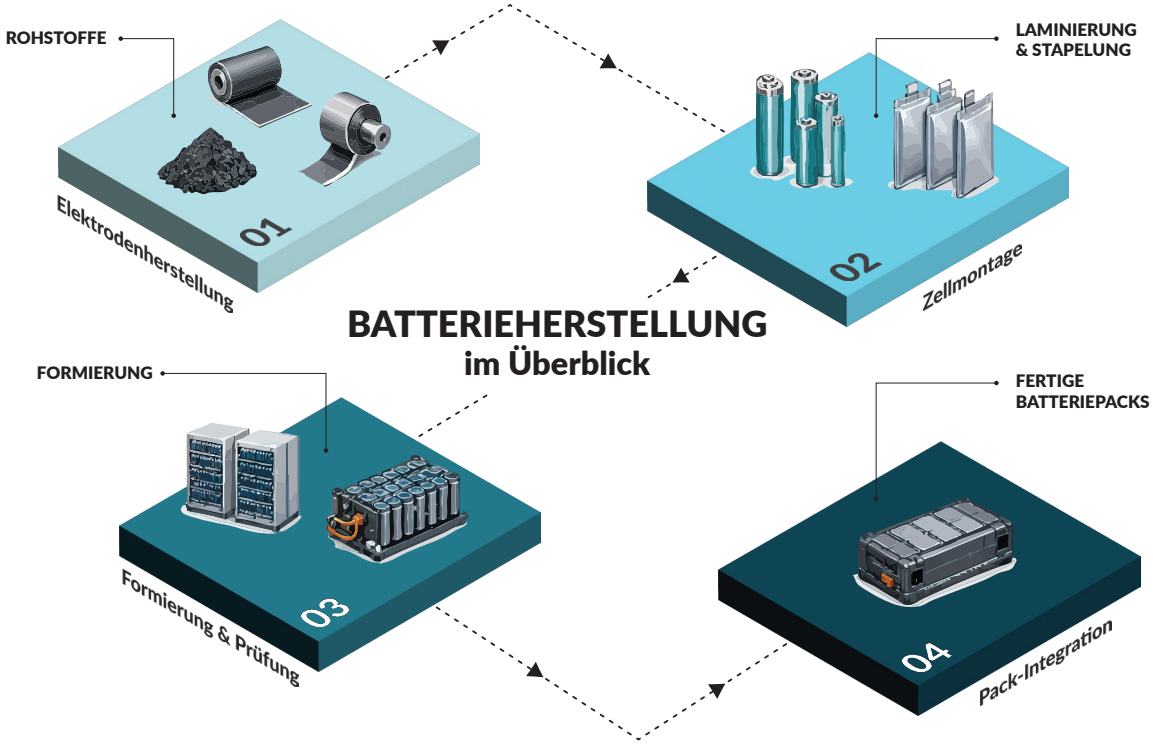
EINLEITUNG

Die zylindrische Lithium-Ionen-Batteriezelle – die Art, die das Elektrofahrzeug in Ihrer Einfahrt antreibt – ist im Kern ein Präzisions-Rolle-zu-Rolle-Konvertierungsprodukt. Der Jelly Roll – die eng gewickelte Baugruppe aus Anode, Kathode und einem Separator, die den funktionalen Teil der Zelle bildet – wird auf Wickelanlagen hergestellt, die denselben grundlegenden physikalischen Prinzipien unterliegen, die jedes Web-Handling-System definieren: Zugspannung, Ausrichtung, Walzendynamik und Geschwindigkeitsregelung.

Was die Batterieelektrodenwicklung von konventionellen Rolle-zu-Rolle-Prozessen unterscheidet, ist nicht die Physik, sondern der Einsatz. Das Substrat gehört zu den empfindlichsten in der industriellen Fertigung: so empfindlich, dass Materialrisse (Web Breaks) kein gelegentliches Ärgernis, sondern ein routinemäßiges und kostspieliges Produktionsereignis sind. Die Materialkosten pro Flächeneinheit gehören zu den höchsten überhaupt. Die Präzisionstoleranzen und Zugspannungsschwankungen übertreffen die praktisch jeder vergleichbaren Konvertierungsanwendung. Und die Folgen eines Fehlers gehen über den Ausschussanteil hinaus.

Der Ausbau der Gigafactories im letzten Jahrzehnt hat erhebliche technische Investitionen in dieses Problem gebracht. Viele nordamerikanische und europäische Gigafactories betreiben Wickelanlagen, die aus Asien importiert wurden – Maschinen, die in ihren Heimatwerken von Technikern mit Tausenden von Stunden praktischer Erfahrung im Feintuning der Parameter und im „Lesen“ der Linie bedient wurden. Dieses angesammelte Wissen wird mit der Anlage nicht mitgeliefert. Wenn die Maschine ankommt, bleibt das institutionelle Know-how zurück, und die Werke müssen die optimalen Betriebsbedingungen von Grund auf neu entdecken – mit teurem Material und zu Produktionskosten.

Doch selbst mit dieser Investition bleiben die Ausschussraten in der Wickelstufe branchenweit hoch, die NPI-Zeitpläne (Neuprodukteinführung) bleiben lang, und physische Experimente an laufenden Produktionsanlagen bleiben die dominierende und kostspieligste Methode zur Fehlerbehebung.



DIE KOSTEN VON WEB-HANDLING-FEHLERN IM GROSSMASSSTAB

Batterieelektrodenfolie weist eine Wertkonzentration pro Flächeneinheit auf, die in der konventionellen Konvertierung keine enge Parallele hat. Das Kathodenaktivmaterial macht etwa 45 % der Kosten einer fertigen Zelle aus, die Anode weitere 13 %. Zusammen machen die beiden Elektroden-Webs mehr als 58 % des Zellwerts aus. Wird ein Jelly Roll aufgrund eines Wickelfehlers ausgeschieden, geht dieser Wert vollständig verloren – es gibt keinen Nacharbeitspfad, keine Teilrückgewinnung.

In einer 10-Gigawatt-Anlage erreichen die Ausschussraten während der NPI routinemäßig 20–30 %, was allein aus der Wickelstufe einen jährlichen Abfall von etwa 49 Millionen US-Dollar erzeugt. Im Dauerbetrieb absorbieren selbst erstklassige Betriebe 15,7 Millionen US-Dollar pro Jahr. Jede prozentuale Reduzierung der Ausschussrate spart etwa 4,9 Millionen US-Dollar jährlich. Maschinenstillstand bei der Fehlerbehebung verursacht zusätzlich 15.000–30.000 US-Dollar pro Stunde – zusätzlich zu den direkten Materialverlusten.

In einer 10-Gigawatt-Batterieproduktionsanlage stellen sich die finanziellen Auswirkungen des Ausschusses in der Wickelstufe wie folgt dar:

Produktionsphase	Jährliche Abfallkosten (10-GWh-Anlage)
Neuprodukteinführung (NPI)	49 Millionen US-Dollar
Vorproduktion	29 Millionen US-Dollar
Dauerbetrieb (Best-in-Class)	15,7 Millionen US-Dollar

GRUNDURSACHENANALYSE: WARUM DAS WICKELN SCHWER ZU KONTROLLIEREN IST

Fehler beim Wickeln von Jelly Rolls haben selten eine einzige Grundursache. Sie entstehen aus vier gekoppelten dynamischen Fehlermodi, die nur schwer isoliert und unabhängig voneinander kontrolliert werden können.

- **Schwankende Zugspannungsregelung:** Die Bahnspannung variiert kontinuierlich mit dem Abwickelrollendurchmesser, der Liniengeschwindigkeit und der Tänzerposition (Dancer). Störungen breiten sich entlang des Bahnwegs so aus, dass sie an ihrem Ursprungsort nicht immer sichtbar sind und sich als Falten, Schichtverformung oder Fehlausrichtung mehrere Meter stromabwärts zeigen.
- **Mehrschichtausrichtung:** Anode, Kathode und zwei Separator-Bahnen müssen in gleichzeitiger, präziser Registerhaltung gewickelt werden. Die Toleranzen liegen im Mikrometerbereich – enger als bei praktisch jeder vergleichbaren Rolle-zu-Rolle-Anwendung – und Fehlausrichtungen in dieser Größenordnung stellen ein direktes Kurzschlussrisiko dar.
- **Walzendynamik und Schlupf:** Walzenträgheit, Bahngeschwindigkeit und Reibung interagieren nichtlinear über die gesamte Linie. Eine Änderung des Walzenzustands an einer Stelle beeinflusst die Spannungszustände stromabwärts auf eine Weise, die nicht vorhersehbar auf die Anpassung einer einzelnen Variablen reagiert.

- **Wickelgeschwindigkeitsschwankun en:** Beschleunigungen, Verzögerungen und Durchmesserübergänge erzeugen transiente Materialspannungen, die in der stationären Analyse unsichtbar sind und häufig die Ursache für Defekte darstellen, die bei konstanter Geschwindigkeit als intermittierend erscheinen.

Die zentrale Herausforderung ist nicht ein einzelner Fehlermodus, sondern deren Wechselwirkung. Zugspannungsschwankungen beeinflussen die Ausrichtung. Walzendynamik beeinflusst die Zugspannung. Geschwindigkeitstransienten stören beide. Genau diese Wechselwirkung macht physisches Trial-and-Error so ungeeignet für die Diagnose und Lösung von Wickelproblemen.

MAPLESIM FOR WEB CONVERTING SYSTEMS: EINE PHYSIKBASIERTE ALTERNATIVE

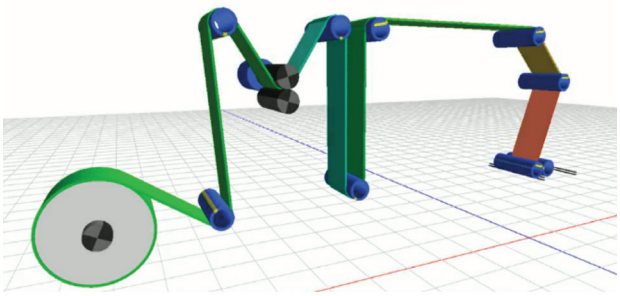
Die meisten Batteriehersteller und Maschinenbauer gehen Wickelprobleme auf die gleiche Weise an: einen Parameter anpassen, die Linie laufen lassen, das Ergebnis prüfen. Das ist ein nachvollziehbarer Instinkt – und ein teurer. Physisches Trial-and-Error verbraucht dasselbe hochwertige Elektrodenmaterial, das die Abfallkosten verursacht. Und da Jelly-Roll-Defekte durch wechselwirkende Variablen verursacht werden, konvergiert die Isolierung einer Grundursache durch Anpassung einzelner Variablen selten schnell. NPI-Zeitpläne dehnen sich auf ein bis zwei Jahre aus – nicht aus Mangel an technischem Können, sondern weil das Lernen an teurem Material, ohne die Erfahrung der Maschinenbediener, die die Anlage über Jahre an der Quelle gemeistert haben, keine Abkürzung kennt.

Die Lücke, die keine empirische Methode füllt, ist die Vorhersagefähigkeit – zu wissen, wie sich das System verhalten wird, bevor die Linie läuft. Genau das bietet MapleSim for Web Converting Systems.

Simulationsumfang: Simulationswerkzeuge arbeiten auf drei unterschiedlichen Ebenen: auf Anlagenebene für Durchsatz und Logistik, auf Bauteilebene für thermische und strukturelle Analysen und auf Systemebene für dynamisches Systemverhalten. MapleSim for Web Converting Systems ist auf der Maschinenebene angesiedelt – der Ebene, auf der Zugspannungsdynamik, Walzeninteraktionen, Dancer-Verhalten, Motorreaktion und Regelungssystemleistung als gekoppeltes System modelliert werden. Hier entstehen die Fehlermodi beim Wickeln von Jelly Rolls, und hier muss ein wirksamer Eingriff ansetzen.

Technische Grundlage: Die symbolische Mathematik-Engine von MapleSim leitet optimierte Systemgleichungen direkt aus physikalischen Modellen auf Komponentenebene ab und bildet das Verhalten über transiente Betriebsbedingungen hinweg genau ab – nicht nur im stationären Zustand. Die Plattform ist multidomänenfähig und integriert mechanische, elektrische, hydraulische und regelungstechnische Dynamik in einer einzigen Umgebung. Die Grundgleichungen aus dem Web Handling Handbook – dem primären technischen Referenzwerk des Fachgebiets – sind direkt im Framework implementiert.

Technische Fähigkeiten: MapleSim for Web Converting Systems bietet Zugspannungsregelungsoptimierung über Wickler- und Abwicklerkonfigurationen hinweg, Mehrschicht-Wickelsimulation, Bewertung von Dancer- und Akkumulator-Designs, Analyse von Walzendynamik und Schlupf, Motor- und Aktuatordimensionierung sowie direkte Integration mit Steuerungscode zur Validierung vor dem Hardware-Einsatz.



Der virtuelle Testworkflow: Ein validiertes Modell der Wickellinie wird aus physikalischen Parametern auf Komponentenebene erstellt und dann genutzt, um physikbasierte Was-wäre-wenn-Szenarien zur Ergebnisvorhersage durchzuführen. Grundursachenhypothesen werden virtuell getestet und ausgeschlossen. Designoptionen werden bewertet, bevor Hardware beschafft wird. Regelungsstrategien werden validiert, bevor sie eingesetzt werden. Technische Entscheidungen, die zuvor physische Versuche erforderten, werden in der Simulationsumgebung getroffen, bevor die Maschine überhaupt berührt wird.

ANWENDUNGSBEISPIELE

Optimierung des Puffersystemdesigns – Europäischer Batteriehersteller

Herausforderung: Ein großer Batteriehersteller musste ein Puffersystemdesign für einen komplexen Abschnitt der Elektrodenwickellinie – mehrere Walzen und eine Akkumulatorstufe – validieren, bevor er sich für Hardware entschied.

Lösung: Maplesoft erstellte und validierte ein MapleSim-Modell des Web-Linienabschnitts und nutzte es, um Walzendimensionierungs- und Pufferkonfigurationsoptionen virtuell zu bewerten. Optimale Designparameter wurden durch Simulation identifiziert, die Hardwarebeschaffung erfolgte auf Basis einer validierten Spezifikation, und wochenlange physische Testzeit sowie Linienstillstand wurden eliminiert.

Lösung von Zugspannungsschwankungen – US-amerikanischer Batteriehersteller

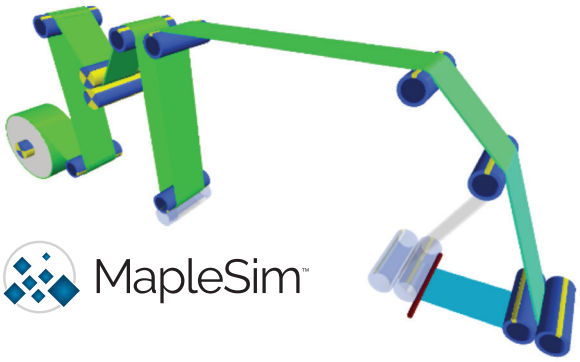
Herausforderung: Ein großer US-amerikanischer Batteriehersteller erlebte anhaltende Zugspannungsschwankungen in einer Produktionswickellinie, die Defekte verursachten und sich der konventionellen Fehlerbehebung widersetzten.

Lösung: Maplesoft erstellte ein vollständiges dynamisches Modell der Wickellinie in MapleSim und nutzte es, um Kandidaten für Grundursachen virtuell zu bewerten – und führte dabei in der Simulation die Tests durch, die sonst Maschinenstillstand und Materialverbrauch erfordert hätten. Die Simulation identifizierte die Grundursache, eine gezielte Modifikation der Web-Linie wurde umgesetzt, und die Schwankungen wurden vollständig behoben. Das validierte Modell wurde für die laufende Prozessoptimierung beibehalten.

Z-Falt-Linien-Design von der Konzeptphase an – Hersteller von Produktionsmaschinen

Herausforderung: Ein Hersteller von Produktionsmaschinen, der eine neue Z-Falt-Batteriemontagelinie entwickelte, musste Walzenplatzierung, Dancer-Konfiguration und Motordimensionierung validieren, bevor Teile bestellt wurden.

Lösung: MapleSim wurde von der ersten Konzeptphase an eingesetzt, um Designoptionen zu bewerten und zu verfeinern, Motor- und Aktuatordimensionierung anhand simulierter Lastprofile durchzuführen und das gesamte Design vor Beginn der Fertigung zu validieren. Der Hersteller trat mit validierten Parametern statt mit Erstiterationsschätzungen in die Bauphase ein, was die physische Designiteration während des Baus erheblich reduzierte.



RENDITE (ROI)

Für eine 10-Gigawatt-Anlage liefert MapleSim for Web Converting Systems eine Reduzierung des Jelly-Roll-Montageausschusses um 15–25 % und eine Reduzierung der physischen Testzeit für neue Wickelkonfigurationen um 20 %. Während der NPI entspricht das jährlichen Einsparungen von 7,35–12,25 Millionen US-Dollar. Im Dauerbetrieb erreichen die Mindesteinsparungen allein aus dieser Phase 2,36 Millionen US-Dollar pro Jahr.

Die gesamte Implementierungsinvestition liegt bei 100.000–300.000 US-Dollar, ohne Hardwareanforderung. Erste umsetzbare Erkenntnisse liegen innerhalb einer Woche nach der Bereitstellung vor, die vollständige Implementierung ist in drei bis fünf Monaten abgeschlossen.

FAZIT

Das Wickeln von Jelly Rolls ist ein Web-Handling-Problem. Die Fehlermodi sind gut verstanden, die Physik ist gut charakterisiert, und die Grundgleichungen sind etabliert. Was bisher gefehlt hat, ist eine praktikable Methode zur Lösung, die nicht auf teuren physischen Experimenten an hochwertigen Produktionsanlagen beruht.

MapleSim for Web Converting Systems bietet genau diese Methode – und verlagert den technischen Workflow von reaktiver Fehlerbehebung hin zu prädiktiver Optimierung. Für Batteriehersteller und Maschinenbauer, die mit den anhaltenden Kosten von Ausschuss in der Wickelstufe konfrontiert sind, stehen die Werkzeuge bereit. Die Frage ist, wie schnell sie eingesetzt werden.

Entdecken Sie MapleSim for Web Converting Systems
www.maplesoft.com/webhandling

Treiben Sie Innovation voran und erschließen Sie Know-how mit physikbasierter Simulation für Rolle-zu-Rolle-Konvertierung.

Cited References
1. Battery Power Online (2023). "The Cost Benefits of Investing in Solutions to Reduce Battery Waste and Scrappage in Gigafactories." batterypoweronline.com
2. Schnell, J. et al. (2020). "Large-scale automotive battery cell manufacturing: Analyzing strategic and operational effects on manufacturing costs." International Journal of Production Economics. sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527320303315
3. EV Design & Manufacturing (2025). "Quality control: How to solve persistent scrap challenges in EV battery manufacturing."
4. S&P Global Mobility (2024). "Looming EV raw materials supply crunch has OEMs eyeing battery recycling." spglobal.com
5. Maplesoft internal analysis (2025). Combined Battery Waste Analysis. Illustrative scenario model based on a 10 GWh facility, $98/kWh material value, 5% winding-related scrap, and a 15 to 25% reduction target.
6. "Challenges and opportunities for high-quality battery production at scale." PMC / National Library of Medicine (2025). pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11725600

Sources & Methodology
The analysis draws on a broader body of published research spanning battery manufacturing economics, electrode materials, scrap and recycling markets, and roll-to-roll processing — including peer-reviewed journals, industry reports, and analyst publications from organisations including Roland Berger, McKinsey, S&P Global, BCG, Nature, and ScienceDirect. Financial figures are based on Maplesoft internal scenario modelling.

Maplesoft
Mathematics • Modeling • Simulation
A Cybernet Group Company

www.maplesoft.com | info@maplesoft.com • Gebührenfrei: (USA & Kanada) 1-800-267-6583 | Direkt: 1-519-747-2373

© Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc., 2026. Maplesoft, Maple und MapleSim sind Marken der Waterloo Maple Inc.
Alle anderen Marken sind Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber.