

Fertigungsmesstechnik in der Batteriezellfertigung zur Ausschussreduktion

Wechselwirkungserfassung zwischen Walzenrundlauf und Elektrodendicke

F. Kößler, R. Hertweck, J. Fleischer

ZUSAMMENFASSUNG Mit der zunehmenden Verbreitung von Lithium-Ionen-Batteriezellen ist eine Eingrenzung der Fertigungstoleranzen erkennbar. Die Dicken der Batterieelektroden, aus denen die Batteriezellen später assembliert werden, haben einen wesentlichen Einfluss auf die elektrochemischen Eigenschaften der fertigen Batteriezelle. Dieser Beitrag untersucht den Einfluss des Rundlaufs der Kalandrierwalzen auf die Elektrodendicke von graphit-basierten Anoden mittels Sensorintegration in einem Batteriekalender.

STICHWÖRTER

Batteriefertigung, Messtechnik, Qualitätssicherung

Sensor integration in a battery calender for interaction detection between roll concentricity and electrode thickness

ABSTRACT With the increasing spread of lithium-ion battery cells, a narrowing of the manufacturing tolerances can be seen. The thickness of the battery electrodes from which the battery cells are later assembled have a significant influence on the electrochemical properties of the finished battery cell. This paper investigates the influence of calender concentricity on the electrode thickness of graphite-based anodes by means of sensor integration in a battery calender.

1 Motivation

Die zunehmende Elektrifizierung des täglichen Lebens basiert wesentlich auf Lithium-Ionen-Batterien als Energiespeicher. Dies gilt sowohl für den Consumer-Bereich, wie zum Beispiel Laptops, Smartphones, Wearables, als auch für die Elektromobilität und die Speicherung elektrischer Energie im Zuge der Energiewende. Dieser Trend der erhöhten Nachfrage nach Batteriezellen führt zu einem weltweiten Ausbau der Produktionskapazitäten begleitet durch eine fortlaufende Optimierung des Produkts. Seit der Kommerzialisierung der Lithium-Ionen-Batteriezelle im Jahre 1991 durch die Firma Sony im Bereich der Consumer-Electronic wurde diese Technologie hinsichtlich Zellchemie und Zellaufbau kontinuierlich weiterentwickelt [1]. Der Einsatz von großformatigen Lithium-Ionen-Batteriezellen als Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge stellt höhere Anforderungen sowohl an die Lebensdauer als auch an die Leistungs- und Energiedichte der Batteriezellen. Das Risiko einer ungleichmäßigen und vorzeitigen Alterung aufgrund ungleichmäßig beschichteter und kalandrierter Batterieelektroden ist bei derartigen Lithium-Ionen-Batteriezellen höher als bei kleinformatigen Lithium-Ionen-Batteriezellen, die im Bereich der Consumer-Electronic eingesetzt werden [2]. Aus diesem Kontext heraus ist eine Einengung der Fertigungstoleranzen für die Prozessschritte Beschichten und Kalandrieren erkennbar. Ein tiefes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Produktionsprozess und Anlagentechnik hilft dabei,

ressourceneffizient und ausschussminimal langlebige Lithium-Ionen-Batteriezellen mit gleichbleibend hoher Qualität zu produzieren.

2 Kalandrieren von Batterieelektroden nach dem Stand der Technik und Forschung

Die Batteriezellfertigung unterteilt sich in die Elektrodenfertigung, die Zellausschleifung und das Zell-Finishing. Bei der Elektrodenfertigung werden metallische Stromsammelervolien mit dem zuvor gemischten Slurry aus elektrochemischen Aktivmaterial, Additiven und Lösungsmittel üblicherweise doppelseitig beschichtet, getrocknet, verdichtet und geschnitten. Die Schichtdicke der Beschichtung beziehungsweise die Gesamtelektrodendicke wird im einstelligen μm -Bereich toleriert und stellt das genaueste geometrische Maß der Batteriezellfertigung dar. Für den Plus-Pol (Kathode) der späteren Batteriezelle wird in der Regel circa $15 \mu\text{m}$ dicke Aluminiumfolie als Stromsammelervolie und Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) oder Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) als Aktivmaterial verwendet. Für den Minus-Pol (Anode) kommt in der Regel eine circa $10 \mu\text{m}$ dicke Kupferfolie als Stromsammelervolie und Graphit oder Hard Carbon als Aktivmaterial zum Einsatz. Die Fertigungstoleranzen der doppelseitig beschichteten, verdichteten Elektrode liegen im Bereich von circa $\pm 2 \mu\text{m}$ bei einer Elektrodendicke von $100 \mu\text{m}$ bis $150 \mu\text{m}$ [2]. In der Zellausschleifung werden Anode und Kathode getrennt

durch einen Separator gestapelt oder gewickelt und anschließend in einem Soft-Case (Pouchzelle) oder Hard-Case (Rundzelle oder prismatische Zelle) verpackt. Durch das Hinzufügen von Elektrolyten beim Zell-Finishing entsteht eine funktionsfähige Batteriezelle.

Das Verdichten der beschichteten Batterieelektroden ist notwendig, da nach dem Trocknen die Elektroden eine Porosität von circa 40 % aufweisen und für den Zellbau eine Porosität zwischen 18 % und 40 % gefordert wird [3, 4]. Hierzu werden die Elektroden in einem Kalandrierprozess mittels eines Walzprozesses verdichtet. Die Porosität der Elektroden ist ein maßgeblicher Produktparameter der späteren Batteriezelle und beeinflusst den Ladungsfluss der Lithium-Ionen im Elektrolyten beim Be- und Entladen. Die Porosität der Elektroden lässt sich nur im Labor mittels Quecksilberporosimetrie oder Betrachtung von REM-Schnittbildern bestimmen, weswegen sich in der Fertigung das Messen der Elektrodendicke als Qualitätsparameter etabliert hat. Die Zielelektrodendicke h_E kann rechnerisch aus der Feststoffdichte der Ausgangsstoffe des Slurrys ρ_{ph} , der Dicke der Stromsammelrolle h_C , des Flächengewichtes der Elektrode m_E , des Flächengewichtes der Stromsammelrolle m_C und der gewünschten Porosität $\epsilon_{C,ph}$ bestimmt werden [5]:

$$h_E = \frac{m_E - m_C}{\rho_{ph}(1 - \epsilon_{C,ph})} + h_C$$

Die Elektrodendicke kann offline taktil mittels Messuhr oder inline mittels optischen Dickenmesssystemen, wie zum Beispiel konfokal-chromatischen Sensoren gemessen werden [6]. Es gilt zu beachten, dass das Messergebnis von dem Messprinzip abhängen kann und taktil gemessene Dicken unter anderem aufgrund der Messkraft sich von optisch gemessenen Dicken unterscheiden können.

Wesentliche Prozessparameter beim Kalandrieren von Batterieelektroden stellen der Walzspalt beziehungsweise die Verdichtungskräfte, die Kalandriergeschwindigkeit, die Walzentemperatur sowie die Bahnspannung bei einem Rolle-zu-Rolle-Materialfluss und die Spezifikationen der Batterieelektrode hinsichtlich Zellchemie, Beschichtungsdicke / Flächenbelastung und verwendeter Stromsammelrolle dar. In der Literatur wurde der Einfluss dieser Parameter auf die Elektrodendicke nach dem Kalandrieren bereits an Labor- und Pilotlinienkalandriern untersucht. Eine Reduktion des Kalandrierspaltes beziehungsweise eine Erhöhung der Verdichtungskräfte geht mit einer Reduktion der Elektrodendicke einher. *Diener et al.* zeigten anhand von NMC-622-Kathoden, dass die Elektrodendicke an der engsten Stelle des Walzspaltes zwischen 4 – 37 % geringer ist als die finale Elektrodendicke nach dem Kalandrierprozess. Die Autoren sprechen von einem Spring-Back-Effekt, der vor allem durch elastische Verformungsanteile ausgelöst wird [7]. Ein Erhöhen der Walzentemperatur führt bei gleichbleibender Zieldicke der Elektroden zu geringeren Verdichtungskräften [8]. *Meyer et al.* konnten an einem Forschungs- und Entwicklungskalandrierer feststellen, dass bei einer Erhöhung der Kalandriergeschwindigkeit von 2 m/min auf 5 m/min der Verdichtungsdruck zunimmt. Einen signifikanten Einfluss auf die Elektrodendicke konnten die Autoren in diesem Geschwindigkeitsbereich nicht erkennen [5]. Der Einfluss von industriellen Kalandriergeschwindigkeiten von > 10 m/min auf die Elektrodendicke wird im Stand der Forschung bisher nicht untersucht.

Vergleichbar zur Umformtechnik hat auch beim Kalandrieren von Batterieelektroden der Walzendurchmesser einen Einfluss auf die benötigten Verdichtungskräfte zum Erreichen der gewünschten Zieldicke. Aufgrund kleinerer Kontaktfläche im Walzspalt von Walzen geringeren Durchmessers werden geringere Verdichtungskräfte benötigt als bei größeren Walzendurchmessern [9]. Während bei Laborkalandriern zum Erreichen einer hohen Rundlaufgenauigkeit im Bereich von $\pm 1-2 \mu\text{m}$ die Walzenlagerung fest vorgespannt ist, kann bei Pilotlinienkalandriern zum Teil die Vorspannkraft der Walzen variabel eingestellt werden [10]. Bei Kaltwalzwerken ist bekannt, dass der Walzenrundlauf sich auf die Materialstärke des Walzproduktes auswirken kann [11]. Bei Batterieelektroden wurde im Stand der Forschung der Einfluss der Vorspannkraft auf die Rundlaufgenauigkeit der Kalandrierwalzen und auf die Elektrodendicke noch nicht untersucht.

3 Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Walzenrundlauf und Elektrodendicke

Ziel dieser Arbeit stellt eine Untersuchung des Einflusses des Walzenrundlaufs bei industriellen Kalandriergeschwindigkeiten > 10 m/min auf die Elektrodendicke dar. Die Untersuchungen wurden an einem zehn Jahre alten Industriebatterieelektrodenkalandrierer (Baujahr 2013) mit 700 mm Walzendurchmesser und 500 mm Walzenballenbreite durchgeführt. Bei der Anlage handelt es sich um einen positionsgeregelten Batterieelektrodenkalandrierer, bei dem die Position von vier Hauptzylindern geregelt wird. Diese vier positionsgeregelten Hydraulikzylinder drücken die inneren Walzenlagerungen auf der Antriebs- und Bedienerseite auseinander, während zwei sogenannte Roll-Bending-Zylinder auf der Antriebs- und Bedienerseite die beiden äußeren Walzenlagerungen zusammenziehen. Ferner wirken auf die beiden Kalandrierwalzen Gewichtskräfte, vgl. **Bild 1**. Durch die Verspannung von Roll-Bending-Zylinder und Hauptzylinder können die vierfach gelagerten Kalandrierwalzen vorgespannt und das Lagerspiel reduziert werden. Als Anlagenparameter kann die Sollposition der Hauptzylinder in μm und die Sollkraft der Roll-Bending-Zylinder in kN vorgegeben werden. Während des Kalandrierens befindet sich immer eine Elektrodenbahn zwischen den Walzen, so dass die Walzen sich nicht berühren. Als zu kalandrierende Batterieelektrode wurde eine doppelseitig beschichtete, graphitbasierte Anode mit $150 \mu\text{m}$ Gesamtelektrodendicke (unkalandriert) verwendet. Die Materialstärke der Kupferstromsammelrolle beträgt $10 \mu\text{m}$ und die Beschichtungsbreite 148 mm. Nähere Informationen zu dieser Elektrode finden sich in der Arbeit von *Smith et al.* [12]. Die Versuche fanden unter Raumtemperatur statt und die Kalandrierwalzen waren nicht temperiert.

Zur Bestimmung des Walzenrundlaufs der beiden Kalandrierwalzen wurden konfokal-chromatische Sensoren (Precitec CHRcodile Mini +) verwendet, die prototypisch mittels 3D-gedruckter Aufnahmen und Magnetstativen in den Kalandrierer integriert wurden, vgl. **Bild 2**. Die Sensoren wurden händisch ausgerichtet. Als Einrichtehilfe für den vom Sensorhersteller vorgegebene Abstand zwischen Sensorkopf und Messobjekt von $6,5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ wurde die vom Sensorhersteller bereitgestellte Software genutzt. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass das Messobjekt sich in dem $600 \mu\text{m}$ großen Messbereich des Sensorkopfs befindet. Die Abtastfrequenz lag bei 4 kHz. Die axiale Auflösung der Sensoren beträgt 25 nm bei einer Linearität von 220 nm.

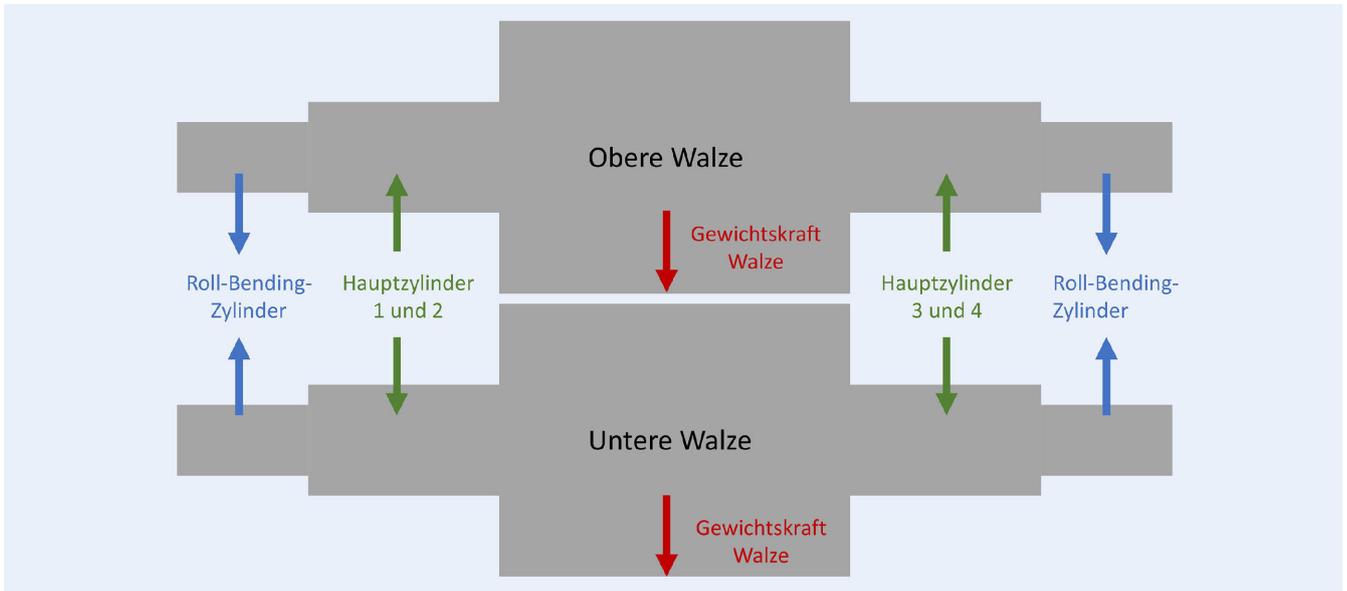


Bild 1. Schematische Darstellung der auf die Kalandrierwalzen wirkenden Kräfte. Grafik: wbk



Bild 2. Rundlaufmessung der oberen (links) und unteren Kalandrierwalze (rechts). Foto: wbk

Tabelle. Versuchsplan zur Untersuchung des Walzenrundlaufs bei variierenden Vorspannkräften.

Versuch	Sollposition Hauptzylinder [μm]	Sollkraft Roll-Beding Zylinder [kN]	Linienlast [N/mm]	Elektroden Dicke [μm] Antrieb- und Bedienerseite
1	2885	50	258	129
2	2885	55	290	128
3	3000	135	245	130

Der Walzenrundlauf wurde bei drei unterschiedlichen Vorspannkräften gemessen, wobei der einstellbare Offset für die Walzenschiefstellung und die Kalandriergeschwindigkeit mit 1 m/min konstant gehalten wurde, vgl. Tabelle. Als niedrigste Vorspannkraft wurde aus praktischen Gründen 50 kN gewählt, da bei geringeren Vorspannkräften der Walzspalt sich nach dem Kalandrieren nicht automatisch öffnet und dies eine taktile Elektrodendickenmessung erschwert. Als maximale Vorspannkraft wurde 135 kN gewählt, da diese oft bei vorhergehenden industriellen Kalandrierversuchen als Maximalwert angesehen

wurde. Die Elektrodendicke wurde bei dieser Versuchsreihe taktill gemessen. Hierzu wurde jeweils eine Rundprobe von $\text{Ø } 18 \text{ mm}$ aus den Elektroden mittels einer Elektrodenstanze (El-Cut) ausgestanzt und deren Dicke anschließend mit einer Messuhr („MarCator 1075R“ von Mahr) gemessen. Die Tabelle zeigt, dass bei einer signifikanten Erhöhung der Walzenvorspannkraft (Sollkraft Roll-Bending-Zylinder) die Sollposition der Hauptzylinder erhöht werden muss, um eine ähnliche Elektrodendicke zu erhalten. Dies bedeutet, dass bei einer signifikanten Erhöhung der Walzenvorspannkraft der Walzspalt abnimmt, wenn die Sollposi-

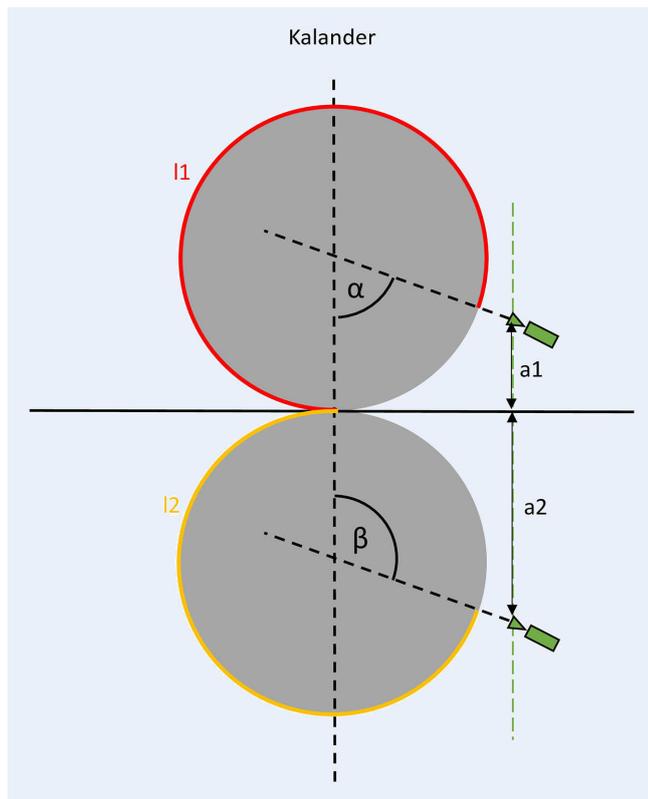


Bild 3. Abstand der Sensorköpfe zur Elektrodenbahn. Grafik: wbk

tion der Hauptzylinder konstant gehalten wird. Als Linienlast wird der Quotient zwischen resultierender Verdichtungskraft und Beschichtungsbreite bezeichnet und dient als Hilfsgröße zur Abschätzung, welcher Verdichtungskraft die Elektrode beim Kalandrieren ausgesetzt ist. Bei der verwendeten Anlage können Linienlasten bis 2000 N/mm gefahren werden. Die Tabelle zeigt, dass die Linienlasten der drei Versuche in einem ähnlichen Bereich liegen, weswegen die Elektrodicken ebenfalls in einem ähnlichen Bereich zu verorten sind.

Bei der Auswertung der Rundlaufmessung muss berücksichtigt werden, dass die konfokal-chromatischen Abstandssensoren den Walzenrundlauf nicht im Walzspalt messen. Bei dem Versuchsaufbau war der obere Sensorkopf 265 mm (Abstand a_1) von der Elektrode und der untere Sensorkopf 540 mm (Abstand a_2) von der Elektrode entfernt, vgl. Bild 2 und Bild 3. Zur Bestimmung des Einflusses des Walzenrundlaufs auf den Walzspalt wurden die Messdaten auf den Walzspalt bezogen, indem diese zeitlich synchronisiert wurden. Dies wurde realisiert, indem über die Abstände a_1 und a_2 die Winkel α und β bestimmt wurden. Aus diesen Winkeln konnten dann die Bogenlängen l_1 und l_2 bestimmt werden, die den Weg von dem gemessenen Punkt bis zum Spalt darstellen. Die Walzen drehten sich mit konstanter Drehzahl, wodurch die Zeiten berechnet werden konnten, bis die gemessenen Punkte den Spalt erreichten (folgend mit Δt_1 und Δt_2 bezeichnet). Eine Änderung des Kalanderspalt wird gemäß der in der Literatur gebräuchlichen Begrifflichkeit als Realspaltänderung bezeichnet, da der Kalanderspalt nicht auf Basis der Positionen der Hydraulikzylinder berechnet wird [7]. Die Realspaltänderung $d(t)$ zum Zeitpunkt t berechnet sich aus der Summe der Differenzen des Sensorabstandes zur oberen Kalandrierwalze d_1 zum Zeitpunkt $t + \Delta t_1$ abzüglich des Mittelwertes \hat{d}_1 und des Sensor-

abstandes d_2 zum Zeitpunkt $t + \Delta t_2$ abzüglich des Mittelwertes \hat{d}_2 . Die Zeitdifferenzen Δt_1 und Δt_2 berechnen sich jeweils bei einer konstanten Walzendrehzahl aus dem Quotienten aus den Bogenlängen l_1 beziehungsweise l_2 und der Kalandriereschwindigkeit v .

$$\text{Realspaltänderung } d(t) = (d_1(t + \Delta t_1) - \hat{d}_1) + (d_2(t + \Delta t_2) - \hat{d}_2)$$

Eine durch elastische Verformung erzeugte Walzenabplattung aufgrund der auf die Kalandrierwalzen wirkende Kräfte wird bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt.

Bild 4 fasst die Messergebnisse der Versuchsreihe zusammen und zeigt auf, dass bei zunehmender Walzenvorspannung die Rundlaufgenauigkeit der einzelnen Kalandrierwalzen zunimmt. Durch die Superposition der Rundlaufgenauigkeiten der oberen und unteren Walze wirkt sich diese zunehmende Rundlaufgenauigkeit der einzelnen Walzen nur bedingt auf den Realspalt aus. Eine Überlagerung des Rundlaufs der oberen und unteren Walze zeigt, dass dies in der Theorie zu einer Realspaltänderung führen kann, die die Dicke der kalandrierten Elektroden beeinflussen kann. Der Grund für den Unterschied zwischen den Rundlaufgenauigkeit der oberen und unteren Walze wird darin vermutet, dass bei der unteren Walze die Gewichtskraft der Walze und die Kräfte der Hauptzylinder in die gleiche Richtung zeigen und ein Vorzeichenwechsel der Kräfte erst außen bei den Roll-Bending-Zylindern erfolgt, vgl. Bild 1. Bei der oberen Walze erfolgt der Vorzeichenwechsel weiter innen bei den Hauptzylindern, so dass sich die Biegelinie der beiden Walzen unterscheidet und die untere Walze stärker durchgebogen wird.

Im nächsten Schritt wurde untersucht, ob beim realen Kalandrierprozess periodische Effekte auftreten, die einen ähnlichen Verlauf aufzeigen wie die Rundlaufmessungen und die rechnerisch bestimmte Realspaltänderung. Durch eine schrittweise Erhöhung der Kalandriereschwindigkeit von 1 m/min bis 30 m/min wurde im gleichen Versuch ein möglicher Geschwindigkeitseinfluss auf die Elektrodendicke untersucht. Für diesen Zweck wurde in den Kalender eine konfokal-chromatische Dickenmessung (Precitec DPS) in einen vorhandenen Granit-C-Bügel integriert, um die Elektrodendicke inline erfassen zu können. Die verwendeten Sensorköpfe haben ein Messbereich von 3 mm, eine axiale Auflösung von 8 nm und eine Linearität von 990 nm. Die Sollkraft der Roll-Bending-Zylinder wurde mit 50 kN ebenso wie die Sollposition der Hauptzylinder mit 2920 μm konstant gehalten. **Bild 5** zeigt die Ergebnisse dieses Versuchs. Während die Linienlast kontinuierlich mit einer Abtastfrequenz von 0,1 kHz aufgezeichnet wurde, wurde die Elektrodendicke aufgrund der Gefahr von Ausreißern in mehreren Sequenzen mit einer Abtastfrequenz 2 kHz erfasst, mit einem gleitenden Mittelwert von 500 geglättet und anschließend zusammengeführt. Sowohl Linienlast als auch Elektrodendicke zeigen insbesondere bei höheren Kalandriereschwindigkeiten einen periodischen Verlauf, dessen Periodendauer jeweils einer Walzenumdrehung von 2,20 m entspricht. Aufgrund des periodischen Verlaufs der Realspaltänderung wird eine Korrelation zwischen dem Linienlastverlauf und der Elektrodendicke vermutet. Die Autoren schlussfolgern daraus, dass bei einem positionsgeregelten Kalender der Rundlauf der Kalandrierwalzen einen Einfluss auf die Verdichtungskräfte und Elektrodendicke haben kann. Bei dem konkreten Versuch liegt die Dickenänderungen im Bereich von $\pm 2 \mu\text{m}$ und somit innerhalb der industriellen üblichen Toleran-

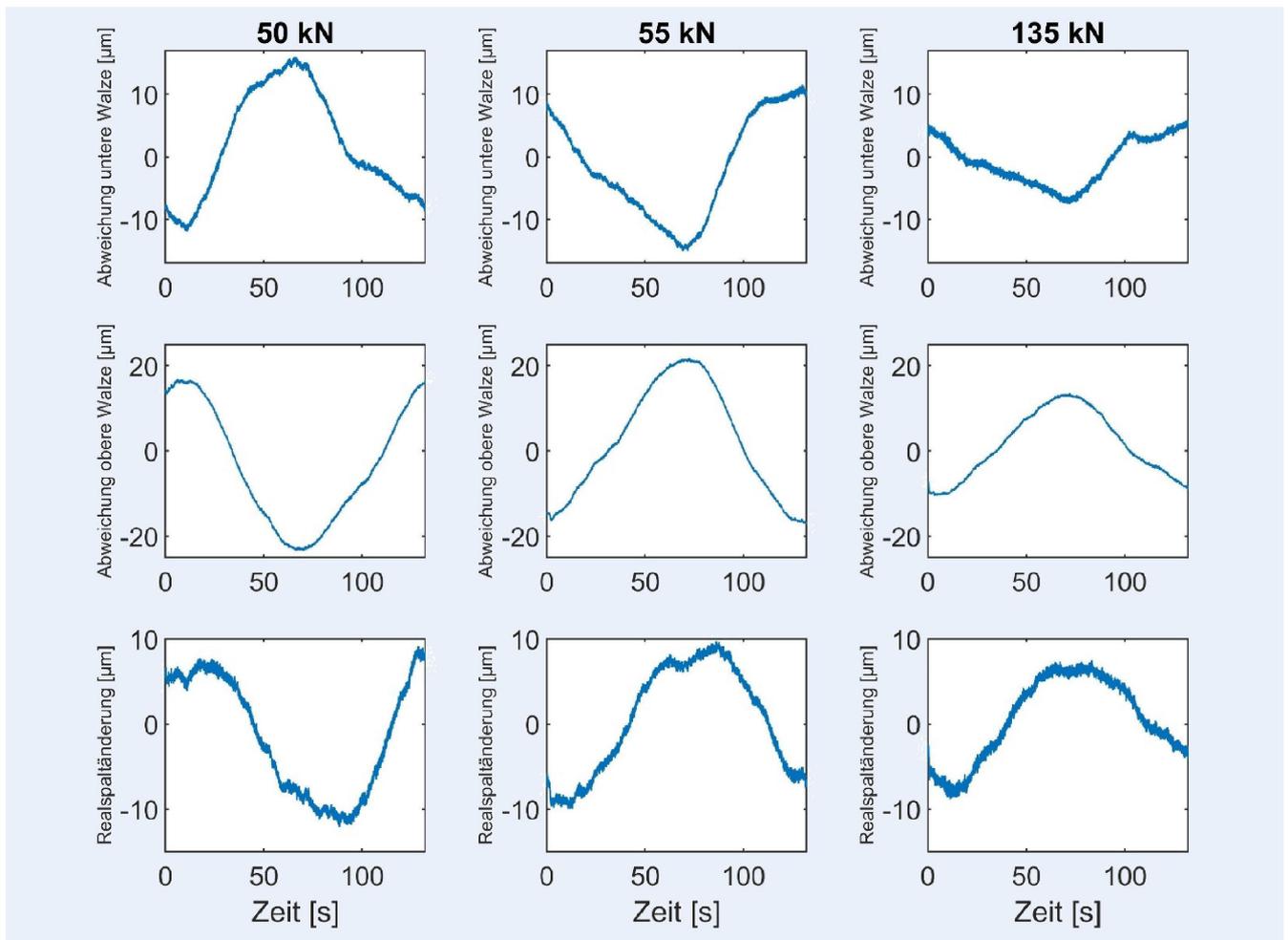


Bild 4. Auf den Walzspalt bezogene rechnerisch bestimmte Realspaltänderung aufgrund des Walzenrundlaufs für circa eine Walzenumdrehung. Grafik: wbk

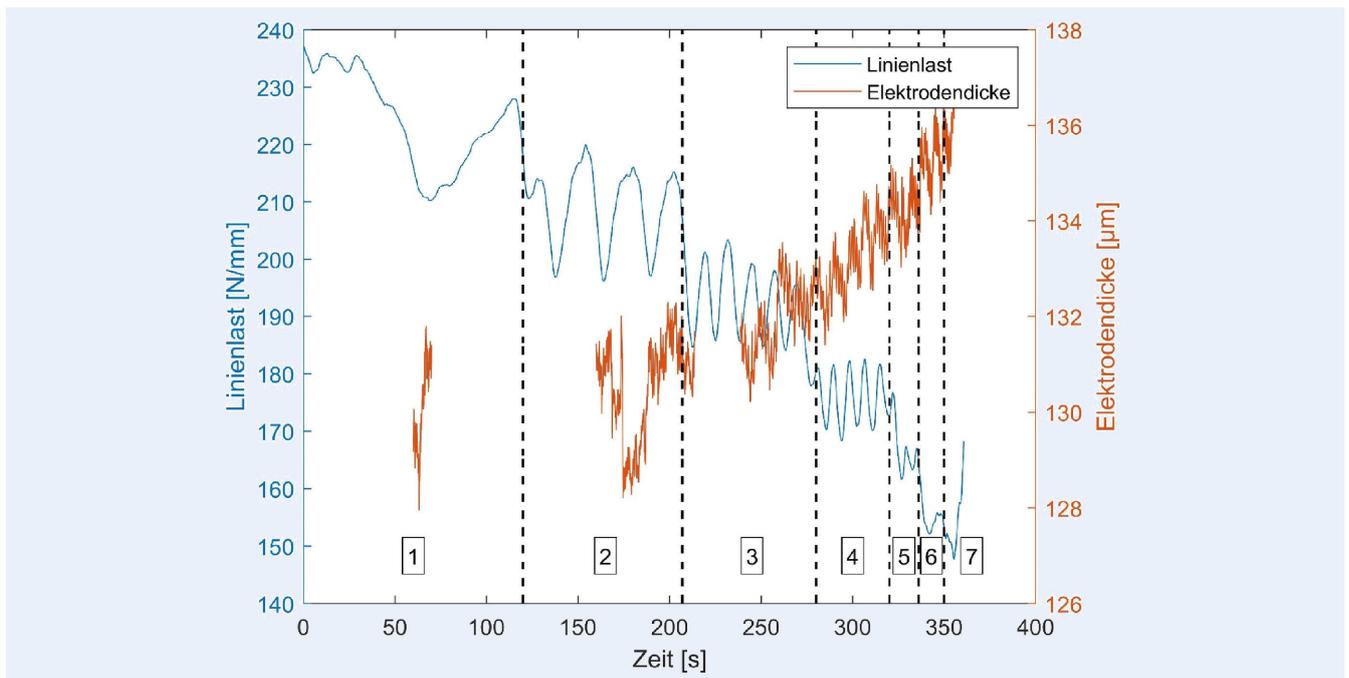


Bild 5. Zeitreihe von Linienlast und Elektrorendicke bei zunehmender Kalandriergeschwindigkeit (Bereich 1: 1 m/min, Bereich 2: 5 m/min, Bereich 3: 10 m/min, Bereich 4: 15 m/min, Bereich 5: 20 m/min, Bereich 6: 25 m/min, Bereich 7: 30 m/min). Grafik: wbk

zen. Die Versuche fanden in einer leicht klimatisierten Laborhalle und nicht in einem vollklimatisierten Messraum statt, weswegen unter anderem Temperatureinflüsse auf das Messergebnis nicht ausgeschlossen werden können. Ferner zeigen die Messergebnisse, dass bei zunehmender Kalandriergeschwindigkeit die Linielast abnimmt und die Elektrodendicke zunimmt. Ob dieser Effekt auf ein geschwindigkeitsabhängiges Verdichtungsverhalten der Elektrode oder auf das Maschinenverhalten oder eine Kombination beider Faktoren zurückzuführen ist, muss in weiteren Arbeiten geklärt werden.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe der Integration von konfokal-chromatischen Abstandssensoren zur Rundlauferfassung und Elektrodendicken- erfassung konnte gezeigt werden, dass der Rundlauf der Kalandrierwalzen sich auf die Elektrodendicke auswirken kann. Der Dickeneinfluss lag bei dem Versuch mit $\pm 2 \mu\text{m}$ innerhalb der Toleranz für Batterieelektroden, so dass dieser vernachlässigt werden kann. Einen höheren Einfluss auf die Elektrodendicke nach dem Kalandrieren übt die Kalandriergeschwindigkeit aus. Diese stieg um circa $6 \mu\text{m}$ bei der schrittweisen Erhöhung der Kalandriergeschwindigkeit von 1 m/min auf 30 m/min. Die Ursachen hierfür sind noch nicht erforscht und sollen in weiteren Arbeiten untersucht werden. In diesem Kontext ist die synchrone Erfassung der Sensor- und Anlagendaten durch einen zentralen Messrechner geplant, um unter anderem KI-Methoden zur Untersuchung möglicher Korrelationen einsetzen zu können.

DANKSAGUNG

Diese Untersuchungen entstanden im Rahmen des Projektes „InteKal – Intelligente Kalandrierung“, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung mit dem Förderkennzeichen 03XP0348C gefördert wird. Die Betreuung liegt beim Projektträger Jülich. Eingebettet ist das Vorhaben in dem Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe (CELEST) und im Batterietechnikum (BATEC) des KIT. Die Autoren danken *Jens Reiser* und *Stefan Imhof* für Ihre Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und Auswertung.

Literatur

- [1] Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg: Springer 2013
- [2] Kaiser, J.; Wenzel, V.; Nirschl, H. et al.: Prozess- und Produktentwicklung von Elektroden für Li-Ionen-Zellen. *Chemie Ingenieur Technik* 86 (2014) 5, S. 695–706
- [3] Zheng, H.; Tan, L.; Liu, G. et al.: Calendering effects on the physical and electrochemical properties of $\text{Li}[\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}]\text{O}_2$ cathode. *Journal of Power Sources* 208 (2012), S. 52–57
- [4] Meyer, C.; Bockholt, H.; Haselrieder, W. et al.: Characterization of the calendering process for compaction of electrodes for lithium-ion batteries. *Journal of Materials Processing Technology* 249 (2017), S. 172–178
- [5] Mayr, A.; Schreiner, D.; Stumper, B. et al.: In-line Sensor-based Process Control of the Calendering Process for Lithium-Ion Batteries. *Procedia CIRP* 107 (2022), S. 295–301
- [6] Diener, A.; Ivanov, S.; Haselrieder, W. et al.: Evaluation of Deformation Behavior and Fast Elastic Recovery of Lithium-Ion Battery Cathodes via Direct Roll-Gap Detection During Calendering. *Energy Technology* 10 (2022) 4, S. 2101033
- [7] Meyer, C.; Weyhe, M.; Haselrieder, W. et al.: Heated Calendering of Cathodes for Lithium-Ion Batteries with Varied Carbon Black and Binder Contents. *Energy Technology* 8 (2020) 2, S. 1900175
- [8] Hoffmann, H.; Spur, G.; Neugebauer, R.: Handbuch Umformen. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag 2012
- [9] Hackfort, T.; Wolters, K.; Wittebrock, H. et al.: Walzenanordnung mit einer Einrichtung zur Regelung des Walzenspaltes sowie Verfahren zur Regelung des Walzenspaltes in einer Walzenanordnung. 29.04.2011. Zugriff am 28.02.2021
- [10] Kugi, A.; Haas, W.; Schlacher, K. et al.: Active compensation of roll eccentricity in rolling mills. *IEEE Transactions on Industry Applications* 36 (2000) 2, S. 625–632
- [11] Smith, A.; Stüble, P.; Leuthner, L. et al.: Potential and Limitations of Research Battery Cell Types for Electrochemical Data Acquisition. *Batteries & Supercaps* 6 (2023) 6



Florian Kößler, M.Sc. 

Foto: Autor

Raphael Hertweck, B.Sc.

**Prof. Dr.-Ing.
Jürgen Fleischer** 

wbk – Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 1523 9502657
florian.koessler@kit.edu
www.wbk.kit.edu

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)