



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Ann-Kathrin Wurba

**Reduktion der Längsfaltenbildung während
des Kalandrierens von Batterieelektroden**

Band 296



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Ann-Kathrin Wurba

Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von Batterieelektroden

Band 296



Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von Batterieelektroden

Zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene
Dissertation

von

Ann-Kathrin Wurba, M.Sc.
aus Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 23.06.2025
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2025

Copyright Shaker Verlag 2025

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

Print-ISBN	978-3-8191-0178-6
PDF-ISBN	978-3-8191-0256-1
ISSN	2944-6430
eISSN	2944-6449

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Be- trachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort der Verfasserin

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes „EXC 2154: POLiS - Post Lithium Storage Cluster of Excellence“.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner Dissertation als Hauptreferent sowie für die vertrauensvolle Zusammenarbeit am Institut. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade für die Übernahme des Korreferats sowie Frau Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler für den Prüfungsvorsitz danken.

Darüber hinaus möchte ich den KollegInnen der Institute IAM-ESS und TFT sowie Cidetec Energy Storage meinen herzlichen Dank für die großzügige Unterstützung und die lehrreiche Zusammenarbeit aussprechen.

Meinen KollegInnen am wbk danke ich ebenfalls für die Unterstützung und die freundliche Arbeitsatmosphäre. Auch möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Sekretariaten, allen Service-Centern und der Werkstatt für die Unterstützung sowie die angenehme Zusammenarbeit bedanken. Gleichermaßen gilt für alle Studierenden, die im Rahmen von Abschlussarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein größter Dank gebührt zuletzt meiner Familie und meinem Mann Raphael, die mich auf dem Weg zur Fertigstellung dieser Dissertation bedingungslos unterstützt und motiviert und somit maßgeblich zum Gelingen beigetragen haben.

Karlsruhe, im Juni 2025

Ann-Kathrin Wurba

Kurzfassung

Um den steigenden Bedarf an Lithium-Ionen-Batterien (LIB) zu decken und den immer anspruchsvolleren Anforderungen gerecht zu werden, müssen sowohl die Materialeigenschaften als auch die Produktionsprozesse optimiert werden.

Der Prozessschritt des Kalandrierens sorgt für die Erhöhung der volumetrischen Energiedichte. Während dieses Prozesses treten verschiedene Fehlerbilder auf, wie z. B. Längsfalten, die in dieser Dissertation beschrieben werden. Längsfalten sind plastische Verformungen, die durch starke Verdichtungen und hohe Bahnzüge verursacht werden. Sie führen zu Maschinenstopps und erhöhen die Ausschussrate. Um die Bildung von Längsfalten zu reduzieren, ist ein tiefgreifendes Material- und Prozessverständnis erforderlich.

Diese Arbeit zeigt eine Methodik zur Charakterisierung der Längsfalten anhand ihrer Höhe, ihrer Breite und ihres Abstands zur Beschichtungskante als Funktion der Prozessparameter Dichte, Bahnzug und Kalanderwalzentemperatur. Darüber hinaus werden die Materialeigenschaften Dehnung, Deformation, Biegesteifigkeit und Haftung der Beschichtung auf dem Substrat analysiert und mit den Eigenschaften der Längsfalten korreliert. Konventionelle Kathoden für LIB werden experimentell untersucht und hinsichtlich der Längsfalten und Materialeigenschaften mit einem flächenzentrierten Versuchsplan verglichen. Die Erkenntnisse scheinen teilweise allgemein anwendbar zu sein, während viele Korrelationen nur für ein Material gelten.

Eine Möglichkeit der Materialoptimierung ist die Entwicklung sogenannter Post-Lithium-Materialien, wie z. B. für die Natrium-Ionen-Batterie. Anhand von Hard Carbon (HC) Anoden wird experimentell gezeigt, dass die Erkenntnisse aus den Kathoden der LIB nicht uneingeschränkt auf HC-Anoden übertragbar sind. Auf der Suche nach allgemeingültigen Korrelationen müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Durch die Anpassung der Prozessparameter können Längsfalten im erforderlichen Prozessfenster nicht verhindert werden. Daher werden Konzepte für eine zusätzliche Vorrichtung zur Reduktion der Längsfaltenbildung entwickelt und als Prototypen realisiert. Das kontinuierliche Rollenkonzept kann die Bildung von Längsfalten in bestimmten Fällen verhindern, da die Deformation der Kathode ausreichend kompensiert werden kann. Das diskontinuierliche Fingergreiferkonzept kann die Höhe der Längsfalten reduzieren, aber nicht verhindern. Die Klemmkraft und damit die Streckwirkung sind bei diesem Prototyp nicht ausreichend, sodass weitere Optimierungen erforderlich sind.

Abstract

The need for lithium-ion batteries is increasing and the requirements for battery properties are becoming more demanding. To meet these requirements, it is important to optimize both the material and the production processes.

The calendering process step is essential for increasing the volumetric energy density. Various defect patterns, such as longitudinal wrinkles, which are described in this dissertation, occur during this process. Longitudinal wrinkles are plastic deformations caused by strong compaction and high web tension. They lead to machine stops and increase the scrap rate. To reduce the formation of longitudinal wrinkles, an in-depth understanding of the material and process correlations is required.

This work provides a methodology for characterizing the longitudinal wrinkles based on their height, width and distance to the coating edge as a function of the process parameters density, web tension and calender roll temperature. Furthermore, the material properties strain, deformation, bending stiffness and adhesion of the coating on the substrate are investigated and correlated with the properties of the longitudinal wrinkles. Conventional cathodes for lithium-ion batteries are experimentally examined and compared with regard to the longitudinal wrinkles and material properties using a central composite design of experiments. It is shown that the findings appear to be partially generally applicable, while many correlations only apply to one material.

One branch of material optimization is the development of so-called post-lithium materials, such as the sodium-ion battery. Using hard carbon anodes, it is shown experimentally that the findings from the lithium-ion battery cathodes cannot be transferred to hard carbon anodes without restriction. In the search for universally valid correlations, further investigations must be carried out.

Adjusting the process parameters cannot prevent longitudinal wrinkles in the required process window. Therefore, concepts for an additional device to reduce the longitudinal wrinkles are developed and realized as prototypes. The continuous roller concept can prevent the formation of longitudinal wrinkles in certain cases, as the deformation of the cathode could be sufficiently compensated. The discontinuous finger gripper concept is able to reduce the height of the longitudinal wrinkles, but cannot prevent them. The clamping force and thus the stretching effect are not sufficient for this prototype, so further optimization is needed.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	V
Formelzeichen	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Technik und Forschung	4
2.1 Produkt Lithium-Ionen-Batterie	4
2.1.1 Batteriezelltypen	4
2.1.2 Aufbau einer Batteriezelle und Funktionsweise	5
2.1.3 Eigenschaften einer Batteriezelle	7
2.2 Batteriezellchemien - Trends und Risiken	8
2.2.1 Lithium-Ionen-Batterie	8
2.2.2 Natrium-Ionen-Batterie	11
2.3 Allgemeiner Herstellungsprozess einer Batteriezelle	12
2.3.1 Elektrodenfertigung	13
2.3.2 Assemblierung	15
2.4 Kalandrieren	16
2.4.1 Industrielle Anwendungen von Kalandern	16
2.4.2 Beschreibung des Walzprozesses	18
2.4.3 Kalandrieren von Elektroden	21
2.4.4 Einfluss des Kalandrierens auf die mechanischen Eigenschaften	26
2.4.5 Zukunftstrends, Anforderungen und Herausforderungen	32
2.4.6 Fehlerbilder und Detektion	33
2.5 Längsfalten und Deformationen in Bahnen anderer industrieller Anwendungen	38
2.5.1 Definitionen und Ursachen von Längsfalten	38
2.5.2 Simulative Untersuchungen der Falten- und Deformationsbildung	41
2.6 Industrielle Maßnahmen gegen Faltenbildung in der Bahnverarbeitung	43

2.6.1	Breitstreckwalzen	43
2.6.2	Abgesetzte Walzen	49
2.6.3	Weitere Entwicklungen	49
2.6.4	Kompensation der Folienverprägung	51
2.7	Ableitung des Forschungsdefizits	52
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	54
3.1	Zielsetzung	54
3.2	Vorgehensweise	55
4	Analyse der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens	57
4.1	Systemanalyse	57
4.1.1	Kalander	58
4.1.2	Elektroden	59
4.1.3	Geometrische Beschreibung der Längsfalten	64
4.1.4	Untersuchung des Zielsystems	66
4.2	Methodik zur Untersuchung der Längsfaltenbildung	67
4.2.1	Datenaufnahme	67
4.2.2	Datenverarbeitung	69
4.2.3	Validierung	73
4.3	Methodik zur Charakterisierung des Materialverhaltens der Elektroden	74
4.3.1	Dehnungsmessung	75
4.3.2	Deformationsmessung	76
4.3.3	Biegeversuche	81
4.3.4	Abschälversuche	83
4.3.5	Reibversuche	84
4.4	Versuchsplanung und statistische Auswertung	85
4.4.1	Versuchsplanung für die Untersuchung der LIB-Kathoden	85
4.4.2	Statistische Auswertung der Untersuchung der LIB-Kathoden	88
4.4.3	Versuchsplanung für die Untersuchung der HC-Anoden	89
5	Einfluss der Material- und Prozessparameter auf die Längsfaltenbildung bei Kathoden für LIB	92

5.1 Einfluss der Prozessparameter auf das Materialverhalten der Elektroden	92
5.1.1 Dehnung	92
5.1.2 Deformation	96
5.1.3 Biegesteifigkeit	98
5.1.4 Adhäsion	101
5.1.5 Reibung	104
5.1.6 Zwischenfazit	105
5.2 Einfluss der Prozessparameter auf die Längsfalte	106
5.2.1 Höhe der Längsfalte	108
5.2.2 Breite der Längsfalte	109
5.2.3 Distanz der Längsfalte zur Beschichtungskante	112
5.2.4 Zwischenfazit	113
5.3 Einfluss des Materialverhaltens auf die Längsfalte	114
5.3.1 Dehnung	114
5.3.2 Deformation	115
5.3.3 Biegesteifigkeit	116
5.3.4 Adhäsion	117
5.3.5 Zwischenfazit	117
5.4 Einfluss des Elektrodenformats auf die Längsfalte	118
5.4.1 Höhe der Längsfalte	119
5.4.2 Breite der Längsfalte	120
5.4.3 Distanz der Längsfalte zur Beschichtungskante	121
5.4.4 Zwischenfazit	122
5.5 Resultierendes Material- und Prozessverständnis	123
6 Übertragbarkeit des Material- und Prozessverhaltens von LIB auf NIB	125
6.1 Einfluss der Prozessparameter auf das Materialverhalten von NIB-Elektroden	125
6.1.1 Dehnung	125
6.1.2 Deformation	126
6.1.3 Biegesteifigkeit	127
6.1.4 Adhäsion	128

6.1.5	Zwischenfazit	131
6.2	Längsfalten bei Hard Carbon Anoden für NIB	132
6.2.1	Höhe der Längsfalte	132
6.2.2	Breite der Längsfalte	133
6.2.3	Distanz der Längsfalte zur Beschichtungskante	134
6.2.4	Einfluss des Materialverhaltens auf die Geometrie der Längsfalte	136
6.2.5	Zwischenfazit	137
7	Materialunabhängige Vorrichtung zur Reduktion der Längsfaltenbildung	139
7.1	Konzeptentwicklung und Umsetzung	139
7.1.1	Randbedingungen und Anforderungen	139
7.1.2	Funktionenstruktur und Prinziplösungen	140
7.1.3	Rollenkonzept	143
7.1.4	Fingergreiferkonzept	146
7.2	Validierung	150
7.2.1	Rollenkonzept	150
7.2.2	Fingergreiferkonzept	153
7.3	Fazit	158
8	Zusammenfassung und Ausblick	160
8.1	Zusammenfassung	160
8.2	Ausblick	162
9	Publikationsliste	165
10	Literaturverzeichnis	167
Abbildungsverzeichnis		I
Tabellenverzeichnis		X
Anhang		XIII

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
Al	Aluminium
CMC	Carboxymethylcellulose
Co	Kobalt
Cu	Kupfer
ESV	Elektrode-Separator-Verbund
E-Modul	Elastizitätsmodul
FAST	Funktionen-Analyse-Systemtechnik
FEM	Finite-Elemente-Methode
GWh	Gigawattstunde
HC	Hard Carbon
HE	Haupteffekt
kal.	kalandriert
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
Li	Lithium
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
Mn	Mangan
Na	Natrium
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
Ni	Nickel
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
NMP	N-Methyl-2-pyrrolidon
NIB	Natrium-Ionen-Batterie
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid

PEN	Polyethylennaphthalat
PET	Polyethylenterephthalat
QE	Quadratischer Effekt
REM	Rasterelektronenmikroskop
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
TRL	Technology Readiness Level
unkal.	unkalandriert
WW	Wechselwirkungen

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
A_P	Fläche einer Probe zur Bestimmung des Flächengewichts	mm ²
A_{Zug}	Fläche einer Zugprobe	mm ²
A_d	Fläche der gedrückten Länge	mm ²
$A_{L,approx.}$	Approximierte Fläche der Längsfalte	mm ²
a	Amplitude	mm
b_B	Beschichtungsbreite	mm
b_E	Elektrodenbreite	mm
b_L	Breite einer Längsfalte	mm
b_{Probe}	Probenbreite für die mechanische Charakterisierung	mm
b_{Sub}	Unbeschichtete Substratbreite	mm
b_{WG}	Walzgutbreite	mm
d_B	Dicke der Beschichtung	µm
d_E	Dicke der Elektrode	µm
d_L	Distanz einer Längsfalte zur Beschichtungskante	mm
d_S	Dicke des Substrats	µm
E	E-Modul	GPa
F_B	Bahnzug	N
F_{Biege}	Biegekraft	N
$F_{Biege,o}$	Oberer Grenzwert der Biegekraft	N
$F_{Biege,u}$	Unterer Grenzwert der Biegekraft	N
F_{FP}	Anpresskraft, die die Flächenpression induziert	N
F_H	Breitenbezogene Haftkraft	N·mm ⁻¹
F_{Haft}	Haftkraft	N
F_N	Normalkraft	N
F_R	Reibungskraft	N

F_{str}	Streckkraft	N
F_W	Walzkraft	N
$F_{Zug,max}$	Maximale Zugkraft	N
f	Durchbiegung	mm
f_o	Oberer Grenzwert der Durchbiegung	mm
f_u	Unterer Grenzwert der Durchbiegung	mm
h_a	Auslaufhöhe des Walzguts	µm
h_e	Einlaufhöhe des Walzguts	µm
h_L	Höhe einer Längsfalte	mm
h_{WG}	Höhe des Walzguts	µm
i	Mechanische Übersetzung	-
k_f	Fließspannung	$N \cdot mm^{-2}$
$k_{WG,max}$	Maximale Druckspannung im Walzgut	$N \cdot mm^{-2}$
l_a	Länge des Walzguts nach der Auslaufebene	mm
l_d	Gedrückte Länge des Walzguts	mm
l_e	Länge des Walzguts vor der Einlaufebene	mm
l_{Biege}	Messlänge im Biegeversuch	mm
M	Flächengewicht der Beschichtung	$g \cdot cm^{-2}$
m_B	Masse der Beschichtung	g
m_E	Masse der Elektrode	g
m_S	Masse des Substrats	g
N	Stichprobenanzahl	-
$P_{B1,LF}, P_{B2,LF}$	Begrenzungspunkte der Längsfaltenbreite	-
P_{BK}	Punkt an der Beschichtungskante	-
P_S	Punkt an der Spitze der Längsfalte	-
p_n	Anteile der Komponenten an der Beschichtungszusammensetzung	-
q_L	Linienlast	$N \cdot mm^{-1}$

R	Walzenradius	mm
R_m	Zugfestigkeit	MPa
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson	-
T_w	Walzentemperatur	°C
u_w	Umfangsgeschwindigkeit der Walze	$m \cdot min^{-1}$
$u_{w,y}$	y-Komponente der Umfangsgeschwindigkeit der Walze	$m \cdot min^{-1}$
v_a	Auslaufgeschwindigkeit des Walzguts	$m \cdot min^{-1}$
v_e	Einlaufgeschwindigkeit des Walzguts	$m \cdot min^{-1}$
v_{FS}	Geschwindigkeit des Walzguts in der Fließscheide	$m \cdot min^{-1}$
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit zwischen Walzgut und Walze	$m \cdot min^{-1}$
v_{WG}	Geschwindigkeit des Walzguts	$m \cdot min^{-1}$
W_{vol}	Volumetrische Energiedichte	$Wh \cdot m^{-3}$
x	x-Achse der Elektrode	-
y	y-Achse der Elektrode	-
Y_A	Auslaufpunkt	-
Y_E	Einlaufpunkt	-
$\overline{Y_E Y_A}$	Projizierte Bogenlänge zwischen Ein- und Auslaufpunkt	mm
Y_{FS}	Punkt der Fließscheide	-
z	z-Achse der Elektrode	-
ΔZ_{Max}	Maximale Höhendifferenz/ Auslenkung/ Deformation	mm
α	Signifikanzniveau	-
β	Biegewinkel	°
γ_B	Verdichtungswiderstand	$N \cdot mm^{-1}$
δ	Winkel im Walzspalt	°
ε	Dehnung	%
ε_x	x-Dehnung	%
ε_y	y-Dehnung	%

ϑ	Anstellwinkel der Rollen	$^\circ$
λ	Wellenlänge	mm
μ_d	Dynamischer Reibungskoeffizient	-
μ_s	Statischer Reibungskoeffizient	-
Π	Verdichtung	-
ρ_B	Dichte der Beschichtung	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
$\rho_{B,kal}$	Dichte der kalandrierten Beschichtung	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
$\rho_{B,unkal}$	Dichte der unkalandrierten Beschichtung	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ρ_{LFP}	Dichte LFP	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ρ_{NMC}	Dichte NMC	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ρ_{ph}	Physikalische Dichte	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
σ	Normalspannung	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
σ_B	Bahnspannung	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
σ_{Druck}	Druckspannung	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
$\sigma_{k,F}$	Kritische Spannung, ab der Falten in Bahnen auftreten	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
$\sigma_{k,B}$	Kritische Spannung, ab der Ausbeulen in Bahnen auftritt	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
σ_q	Spannung quer zur Laufrichtung	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
σ_W	Kritische Spannung einer Bahn gegen Bahnwanderung	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
σ_{WG}	Druckspannung im Walzspalt	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
σ_{Zug}	Zugspannung	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
τ	Schubspannung	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
Φ	Porosität	-
Φ_0	Initiale Porosität	-
Φ_{min}	Minimal erreichbare Porosität	-
φ	Verdichtungsfaktor	-

1 Einleitung

Einleitend wird die vorliegende Dissertation zunächst motiviert. Im Anschluss erfolgt ein kurzer Überblick über den Aufbau der Arbeit.

1.1 Motivation

Die globale Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIB) stieg in den letzten 10 Jahren kontinuierlich um ca. 25 % pro Jahr an. So lag die Gesamtenergie im Jahr 2020 bei etwa 282 GWh. Die vorhergesagte globale Marktnachfrage nach gespeicherter Energie liegt für 2030 bei etwa 2.600 GWh. (Frieske & Huber et al. 2022, S. 94) Prognosen gehen davon aus, dass im Jahr 2040 jährlich über 60 Millionen elektrische Fahrzeuge verkauft werden (Mohammadi & Saif 2023, S. 3). Neben der steigenden Nachfrage nehmen auch die Anforderungen an die LIB zu. Für die Anwendung im Fahrzeug zählen dazu insbesondere höhere Energie- und Leistungsdichten, Schnellladefähigkeit, eine lange Lebensdauer, die Einsatzfähigkeit in einem breiten Temperaturbereich, aber auch Sicherheit (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 1). Im Vergleich zu einem Verbrenner-Fahrzeug sind die Kosten für ein batterieelektrisches Fahrzeug noch immer sehr hoch, was viele potenzielle Kunden vom Kauf abhält (König & Nicoletti et al. 2021, S. 19). Weiter führt die Europäische Kommission die für die LIB essenziellen Rohstoffe Lithium (Li), Kobalt (Co) und natürliches Graphit aufgrund ihrer wirtschaftlichen Bedeutung, aber auch durch das drohende Versorgungsrisiko in ihrer Liste der kritischen Rohstoffe 2020 auf (European Commission 2020, S. 2–3).

Um den Anforderungen gerecht zu werden und Risiken abzumildern, gibt es mehrere Möglichkeiten der Optimierung. So können beispielsweise wie beim sogenannten Cell-to-Pack-Design (dt. Zelle zu Pack) der Aufbau von Modulen und die zugehörige Peripherie eingespart werden, da die Zellen direkt in das Batteriepack integriert werden. Dies führt zu einer Steigerung der Energiedichte. (Wang & Wang et al. 2021, S. 1–2) Weiter können kritische Rohstoffe wie Co durch weniger kritische wie Nickel (Ni) ersetzt werden, bestehende Materialien können weiter verbessert werden und neue Batteriezellchemien wie Natrium-Ionen-Batterien (NIB) können entwickelt werden (Fichtner 2022, S. 2–3, 6).

Hohe Ausschussraten bei der Herstellung von LIB-Zellen im zweistelligen Bereich sind nach wie vor eine große Herausforderung für die Batterieproduktion (Wessel & Turetskyy et al. 2021, S. 1). Dabei entfällt mit fast 75 % ein Großteil der Herstellungs-kosten einer Batteriezelle auf das Material. Wiederum 50 % werden dabei für die

Kathode aufgewendet, während die Anode mit etwa 14 % einkalkuliert werden muss. (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 295) Aufgrund der hohen Materialkosten ist Ausschuss daher bereits in der frühen Produktionsphase kostspielig.

Gleichzeitig ist die Herstellung von LIB energieintensiv, wobei der größte Teil der Energie beim Beschichten und Trocknen benötigt wird. Auch das Kalandrieren erfordert einen nicht zu vernachlässigenden Energieanteil, insbesondere für die Kathode. Der Energieverbrauch, der auf den Ausschuss entfällt, treibt daher die Kosten nach oben. Die höchste Ausschussrate tritt ebenfalls beim Beschichten auf, wobei auch das Kalandrieren von Kathoden fehleranfällig ist. (Kehrer & Locke et al. 2021, S. 3; Wessel & Turetskyy et al. 2021, S. 388, 391) Laut einer Expertenbefragung entstehen die höchsten Ausschussraten im Labormaßstab bei Anfahrprozessen, während bei der Großserienproduktion der größte Teil des Ausschusses im regulären Betrieb auftritt. Für eine effiziente Produktion muss die Ausschussrate der einzelnen Prozessschritte unter 1 % fallen. Gleichzeitig gibt es unter anderem in Deutschland zu wenig Erfahrung im Bereich der Batterieproduktion. (Kehrer & Locke et al. 2021, S. 1,3) Ausschuss kann also durch optimierte Produktionsstrategien und -prozesse minimiert werden, was die Kosten senken und die Eigenschaften der Batterien verbessern kann. Dazu ist ein tiefgreifendes Material- und Prozessverständnis vonnöten.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es daher, das Fehlerbild Längsfalte im Kalandrierprozess zu untersuchen, ein fundiertes Material- und Prozessverständnis aufzubauen sowie einen Lösungsvorschlag zur Verminderung der Längsfaltenbildung zu erarbeiten. So kann die Ausschussrate, die ihren Ursprung im Prozessschritt des Kalandrierens hat, zukünftig gesenkt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Wie bereits beschrieben, muss zur Erreichung des Ziels dieser Dissertation zunächst ein tiefgreifendes Material- und Prozessverständnis erlangt werden. Dies wird anhand von experimentellen Untersuchungen an konventionellen Kathoden durchgeführt. Neu entwickelte Materialsysteme befinden sich derzeit überwiegend in frühen Entwicklungsstadien. Um den Transfer zum Industriemaßstab zu erleichtern, ist es unabdingbar, so früh wie möglich Aussagen hinsichtlich der Produzierbarkeit dieser neuen Materialsysteme treffen zu können. Daher wird in dieser Arbeit ein Vergleich zu Anoden für NIB gezogen. Zuletzt soll ein von Material und Prozessfenster unabhängiger und somit flexibler Lösungsansatz zur Reduktion der Längsfaltenbildung gefunden werden.

Somit ergibt sich die folgende Struktur dieser Dissertation:

Zunächst werden in Kapitel 2 der Stand der Technik und Forschung in Bezug auf die Batteriezellproduktion und insbesondere der Prozessschritt des Kalandrierens erläutert. Dabei werden auch die zum Verständnis dieser Arbeit benötigten Grundlagen dargestellt. Zuletzt wird das Forschungsdefizit abgeleitet.

Aus dem Stand der Technik und Forschung wird in Kapitel 3 die Zielsetzung definiert und ein Überblick über die Vorgehensweise gegeben.

In Kapitel 4 wird zunächst das zu untersuchende System analysiert. Im Anschluss wird die Längsfaltenbildung in Elektroden durch das Kalandrieren im Detail eingeführt. Weiter werden alle in dieser Arbeit verwendeten Methoden zur Charakterisierung der Materialeigenschaften und der Geometrie der Längsfalten dargelegt. Zuletzt werden die Versuchsplanung und die statistische Auswertung beschrieben.

Der Einfluss der Material- und Prozessgrößen auf die Längsfaltenbildung in konventionellen Kathoden für LIB wird in Kapitel 5 erläutert.

In Kapitel 6 wird geprüft, inwieweit sich die in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnisse auf Anoden für NIB übertragen lassen. Dazu werden die Materialeigenschaften gegenübergestellt und auch der Einfluss der Prozessparameter auf die Geometrie der Längsfalten verglichen.

Um die Elektroden unabhängig vom gewählten Prozessfenster verarbeiten zu können, werden in Kapitel 7 zwei potenzielle Lösungen zur Reduktion der Längsfaltenbildung konzeptioniert, prototypisch umgesetzt und deren Funktionsfähigkeit validiert.

Kapitel 8 fasst die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Überblick über ausstehende Fragestellungen und mögliche weitere Optimierungen.

2 Stand der Technik und Forschung

Im Folgenden werden alle für diese Arbeit benötigten Grundlagen dargelegt. Weiter wird der Stand der Technik und Forschung ausführlich beschrieben, um das Forschungsdefizit ableiten zu können.

2.1 Produkt Lithium-Ionen-Batterie

Die LIB ist noch immer die Standardbatterie für viele Anwendungen, wie beispielsweise tragbare elektronische Geräte und Fahrzeuge, aber auch stationäre Speicher (Liu & Zhang et al. 2021, S. 1). Daher wird im Folgenden ein Überblick über die Batteriezelltypen, den Aufbau und die Funktionsweise einer Batteriezelle am Beispiel der LIB gegeben. Die Batteriezellen können im Anschluss zu Modulen verbunden werden, die wiederum zu ganzen Batteriesystemen zusammengeführt werden können (Korthauer & Pettinger 2013, S. 14–15). Da die Weiterverarbeitung der Batteriezellen für das Verständnis dieser Arbeit nicht von Relevanz ist, wird im Folgenden auf eine weitere Ausführung verzichtet.

2.1.1 Batteriezelltypen

Eine Batteriezelle ist ein elektrochemisches System. Es besteht im Wesentlichen aus einer Anode und einer Kathode, welche über einen leitfähigen Elektrolyt Ionen austauschen. Die beiden Elektroden sind durch einen ionendurchlässigen Separator voneinander isoliert. Batterien umfassen Primärzellen, die nur einmal entladen werden können, und Sekundärzellen, welche mehrere Lade- und Entladezyklen durchlaufen können. Sekundärzellen werden auch als Akkumulatoren bezeichnet. (Börger & Wenzl 2023, S. 16–17) In dieser Arbeit werden ausschließlich Sekundärzellen betrachtet. Diese werden im Folgenden vereinfacht als Batterie bezeichnet.

Auf dem LIB-Markt gibt es hauptsächlich drei verschiedene Batteriezelltypen, die Rundzelle, die prismatische Zelle und die Pouch-Zelle. In Abbildung 2-1 sind die drei Batteriezelltypen schematisch dargestellt. Sie kommen in Fahrzeugen, elektronischen Geräten wie Handys und Laptops, aber auch z. B. in Werkzeugen wie Akkuschraubern vor. Ihr Gehäuse ist metallisch und unterscheidet sich im Wesentlichen durch die Form. (Korthauer & Pettinger 2013, S. 111–112)

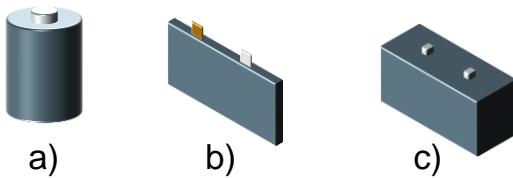


Abbildung 2-1 Batteriezelltypen im Überblick: a) Rundzelle, b) Pouch-Zelle, c) prismatische Zelle in Anlehnung an (Korthauer & Pettinger 2013, S. 112)

2.1.2 Aufbau einer Batteriezelle und Funktionsweise

Wie in Abbildung 2-2 schematisch dargestellt, bestehen Elektroden aus einer dünnen Stromsammlerfolie, auch Ableiterfolie oder Substrat genannt, und der Beschichtung. Elektroden sind also Verbundmaterialien. (Korthauer & Pettinger 2013, S. 23)

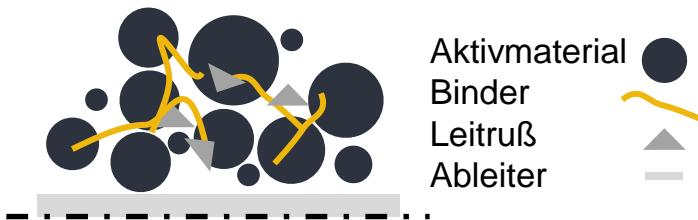


Abbildung 2-2 Schematische Darstellung der Oberseite einer spiegelsymmetrischen Beschichtung

Die Dicke der Substrate wurde über die letzten Jahre stetig reduziert. Auf der Kathodenseite wurden 2019 Aluminiumfolien mit einer Dicke von lediglich 10 µm in kommerziellen Batteriezellen verwendet (Zhu & Gastol et al. 2021, S. 2). Gängige Al-Folien für Kathoden befinden sich jedoch in einem Bereich von 12-20 µm, während auf der Anodenseite Kupferfolien der Dicke 6-10 µm zum Einsatz kommen (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 291). Der Einsatz von Kupfer ist essenziell, da der Spannungszustand auf der Anodenseite unter Verwendung von Al ungewünschte Li-Al-Legierungen hervorrufen würde. Die Beschichtung ist ein Feststoffgemisch, unter anderem bestehend aus dem Aktivmaterial, auf welches in Kapitel 2.2 weiter eingegangen wird. Weitere Bestandteile sind Komponenten zur Verbesserung der Leitfähigkeit, die auch als Leitadditive bezeichnet werden. Häufig wird Leitruß mit einem Anteil von etwa 1-5 % eingesetzt. Die Partikel werden durch einen Binder zusammengehalten, der auch für ausreichend Haftung auf dem Substrat sorgt. (Korthauer & Pettinger 2013, S. 23) Übliche Anteile an der Komposition sind 1-4 %. Zur Applikation der Komponenten in Form einer Suspension auf das Substrat wird ein Lösungsmittel eingesetzt. Der Binder Polyvinylidenfluorid (PVDF) wird häufig mit N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP) kombiniert, da PVDF wasserunlöslich ist. Wässrige Pasten werden überwiegend mit dem Bindersystem

Carboxymethylcellulose (CMC)/ Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) hergestellt. Für Graphit-Anoden ist diese Kombination der Stand der Technik und hat den Vorteil, dass aufgrund der Abwesenheit von NMP keine Gesundheitsgefahr droht. (Korthauer & Pettinger 2013, S. 23, 26; Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 291)

Im Folgenden wird die Funktionsweise einer Batteriezelle am Beispiel der LIB erläutert. Abbildung 2-3 veranschaulicht den Aufbau und die Funktionsweise anhand des Entladeprozesses schematisch.

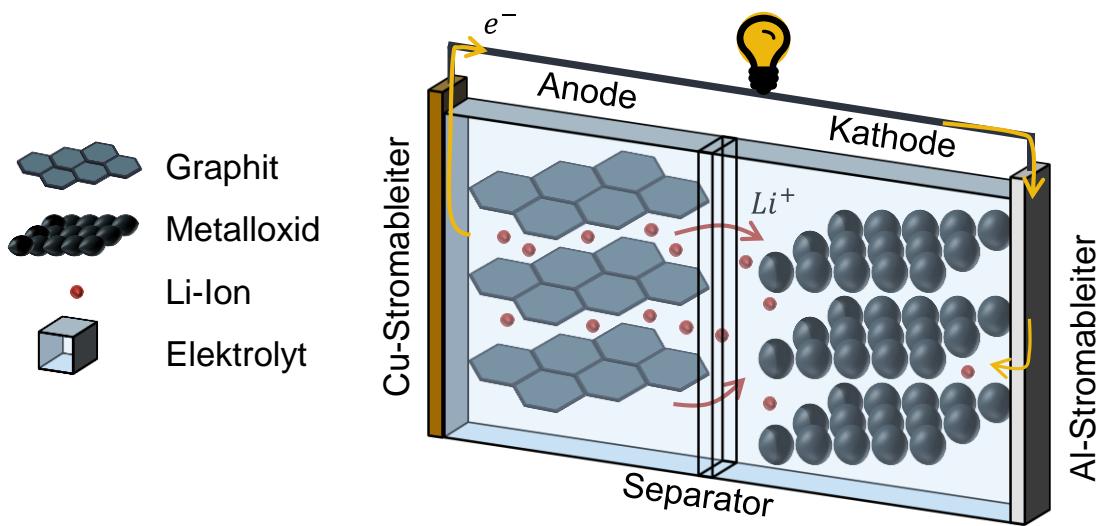


Abbildung 2-3 Aufbau und Funktionsweise einer LIB im Entladestand in Anlehnung an (Börger & Wenzl 2023, S. 290; Korthauer & Pettinger 2013, S. 15)

Es sind eine Graphit-Anode sowie eine Metallocid-Kathode gezeigt, die durch einen Separator getrennt und von einem Elektrolyten durchtränkt sind. Weiter ist ein externer Leiter abgebildet, der die Stromableiter verbindet. Die Elektronen- und Li-Ionen-Ströme sind in Form von Pfeilen angedeutet. Die Funktionsbasis bilden Ein- und Auslagerungsvorgänge der Li-Ionen in das Wirtsgitter, die auch als Interkalation bzw. Deinterkalation bezeichnet werden. Beim Laden und Entladen wandern die Ionen zwischen Anode und Kathode hin und her. Im geladenen Zustand befinden sich die Li-Ionen im Wirtsgitter des Anodenaktivmaterials. Beim Entladestand werden die Li-Ionen aus dem Wirtsgitter ausgelagert und wandern mithilfe des ionenleitfähigen Elektrolyten durch den Separator zur Kathode. Dort interkalieren sie in die Wirtsstruktur. Gleichzeitig wandern Elektronen aus der Anode über einen externen Leiter ebenfalls zur Kathode. Beim Laden kehrt sich der Prozess um. (Börger & Wenzl 2023, S. 288; Korthauer & Pettinger 2013, S. 14–15)

2.1.3 Eigenschaften einer Batteriezelle

Als Kapazität einer Batterie wird die Ladungsmenge betrachtet, die unter genau definierten Bedingungen entladen werden kann. Die Einheit ist in diesem Kontext 1 Ah. (Börger & Wenzl 2023, S. 17) Die theoretische spezifische Kapazität bezeichnet die Kapazität pro Masse in $\text{Ah}\cdot\text{kg}^{-1}$ und setzt die vollständige Umwandlung der elektrochemisch aktiven Masse einer Batteriezelle voraus. In der Praxis ist dies technisch jedoch nicht möglich. Die praktisch erhaltenen Werte sind stets geringer. (Börger & Wenzl 2023, S. 21–22) Eine Batteriezelle besteht aus zwei elektrochemischen Halbzellen. Zwei verbundene Halbzellen werden als galvanische Zelle bezeichnet. Beide Halbzellen haben unterschiedliche Normalpotenziale, deren Differenz im unbelasteten Zustand als Leerlaufspannung definiert wird. Die Leerlaufspannung wird durch die Li-Konzentration in den Elektroden beeinflusst, weshalb die Leerlaufspannung bei der Entladung abnimmt. Als Entladeschlussspannung wird die Spannung definiert, die am Ende der Entladung vorliegt, also wenn alle Li-Ionen wieder in die Kathode interkaliert sind. Sobald ein Verbraucher angeschlossen wird, verringert sich die Spannung um den Anteil, der am Innenwiderstand der Batterie bei einer bestimmten Stromstärke abfällt. Die verminderte Spannung wird als Klemmspannung bezeichnet. Der nutzbare Spannungsbereich wird durch die Ladeschlussspannung und die maximale Ladespannung begrenzt, da es andernfalls zu irreversiblen Schäden kommen kann. (Kurzweil & Dietlmeier 2018, S. 166, 170–171, 236) Die theoretische spezifische Energie einer Batteriezelle berechnet sich aus der maximalen Leerlaufspannung und der theoretischen Kapazität. Dabei wird angenommen, dass die Zellreaktionen verlustfrei ablaufen, was jedoch nicht der Realität entspricht. Die theoretische spezifische Energie kann daher nur als Vergleichswert für die verschiedenen Batteriesysteme dienen. (Börger & Wenzl 2023, S. 26) Die spezifische Energie wird auch als Energiedichte bezeichnet. Es wird zwischen der gravimetrischen Energiedichte mit der Einheit $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ und der volumetrischen Energiedichte $\text{Wh}\cdot\text{l}^{-1}$ unterschieden. (Korthauer & Pettinger 2013, S. 199, 203) Für Anwendungen, die lediglich einen geringen Bauraum aufweisen, ist besonders die volumetrische Energiedichte von großer Relevanz. Je höher die volumetrische Energiedichte, desto kleiner der Platzbedarf für die gleiche Menge an Aktivmaterial. Dies betrifft vor allem tragbare Geräte sowie Fahrzeuge. (Meyer & Kosfeld et al. 2018, S. 371) Die Energiedichte ist außerdem insbesondere im Fahrzeug für eine hohe Reichweite essenziell (Korthauer & Pettinger 2013, S. 31). Fahrzeuge wie beispielsweise der Nissan Leaf haben mit einer Ladung eine Reichweite von bis zu 400 km, wobei auch

von Fahrzeugen mit einer Reichweite von bis zu 780 km berichtet wird. (Kampker & Heimes 2024, S. 64; Szumska & Jurecki 2021, S. 2). Neben der Reichweite ist die Schnellladefähigkeit besonders im Fahrzeug relevant. Das Aufladen zu einem Ladezustand von 90 % in unter 30 Minuten wird derzeit als Schnellladen bezeichnet. (Börger & Wenzl 2023, S. 325) Die Zyklenstabilität beschreibt die Verminderung der spezifischen Kapazität über die Anzahl der durchlaufenen Zyklen. Am Ende der Lebensdauer hat die Batterie kritische Grenzwerte unterschritten, die von der Anwendung abhängig sind. Bei Elektrofahrzeugen ist dies oft die Kapazität, mit einem Schwellwert von 80 % gegenüber der ursprünglichen Kapazität. (Korthauer & Pettinger 2013, S. 55, 410) Beispielsweise schaffen LIB für Elektrofahrzeuge je nach Nutzungsverhalten um die 3000 Zyklen (Dormann & Sann-Ferro et al. 2021, S. 12). Hinsichtlich der Sicherheit von Batterien sind neben den elektrischen Gefahren insbesondere das potenzielle Austreten giftiger bzw. gefährlicher Gase und Flüssigkeiten sowie die Brand- und Explosionsgefahr zu nennen. So ist beispielsweise das Lösungsmittel der Elektrolyte meist leicht entzündlich. Ursachen dieser Gefahren können übermäßige Überladung, Laden bei tiefen Temperaturen, mechanische Beschädigungen sowie interne Kurzschlüsse sein. Besonders Kurzschlüsse können auch eine Folge der Beschädigung des Separators sein. (Börger & Wenzl 2023, S. 289, 303, 308, 311, 344)

2.2 Batteriezellchemien - Trends und Risiken

Im Folgenden wird ein Überblick über Trends und Risiken zu den derzeit eingesetzten Batteriezellchemien für LIB gegeben. Gleichermaßen wird auch für die NIB dargestellt.

2.2.1 Lithium-Ionen-Batterie

Für Anode, Kathode und Elektrolyt gibt es eine Vielzahl von Materialsystemen. So können Eigenschaften einer Batteriezelle wie beispielsweise Kosten oder Lebensdauer bis zu einem gewissen Grad durch die geeignete Kombination der Komponenten gezielt eingestellt werden. Auf der Kathodenseite kommen meist Metalloxide oder -phosphate zum Einsatz, während auf der Anodenseite fast ausschließlich Graphit und weitere Kohlenstoffmaterialien den Markt beherrschen. Lithiumtitanat (LTO) ist aktuell noch eine Nischenanwendung und der Einsatz von Silizium ist noch Gegenstand der Forschung. Bekannte Li-Aktivmaterialien auf dem Markt sind beispielsweise Lithium-Eisen-Phosphat (LFP), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA), Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC), auch als Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan-Oxid (NCM) bekannt. (Börger

& Wenzl 2023, S. 289–290) In dieser Arbeit wird ausschließlich die Bezeichnung NMC verwendet.

Die für die LIB wichtigsten Rohstoffe Li, Co und natürliches Graphit sind in der Liste der kritischen Rohstoffe 2020 der Europäischen Kommission aufgeführt. Faktoren für ein Versorgungsrisiko sind die Konzentration der globalen Produktion auf wenige Länder und die Lieferkette in die EU sowie die Regierungsführung der Herkunftsländer. (European Commission 2020, S. 2–3) In Bezug auf die Versorgung werden Co und natürliches Graphit als moderat risikoreich und Li als niedrig auf einer Skala von sehr hoch bis sehr niedrig eingestuft. Insgesamt werden lediglich 1 % aller Rohstoffe für Batterien in der EU produziert. (Bobba & Carrara et al. 2020, S. 10–11) Es besteht also ein hohes geopolitisches Versorgungsrisiko.

Aufgrund der Herausforderung, den sich ständig ändernden Anforderungen an die LIB hinsichtlich Performance, Kosten, Nachhaltigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit gerecht zu werden, werden die Aktivmaterialien stetig weiterentwickelt.

Dies zeigt sich unter anderem an der Reduktion des Co-Anteils in LIB. Eine der ersten Kathoden aus den 1990er Jahren basierte auf dem Aktivmaterial LiCoO_2 , welches für automobile Anwendungen nicht geeignet war. So wurde der Ansatz verfolgt, den Co-Anteil zu reduzieren und Co durch Ni und Mangan (Mn) zu ersetzen. Es entstand das noch heute eingesetzte NMC. Zu Beginn enthielt das sogenannte NMC111 die Metalle Ni, Mn und Co zu gleichen Teilen. Der Co-Anteil wurde über das NMC622 und NMC811 stetig reduziert. (Fichtner 2022, S. 2–3) In modernsten NMC-Konfigurationen ist der Co-Anteil auf 2,5 % gesunken (Ryu & Sun et al. 2021, S. 846). Abbildung 2-4 zeigt, dass die Weiterentwicklung des NMCs zu einer höheren Kapazität unter Einbußen der Kosten und Sicherheit sowie der Schnellladefähigkeit geführt hat (Börger & Wenzl 2023, S. 296).

Eine Alternative ist das Kathoden-Aktivmaterial LFP, in welchem auf Co verzichtet wird. Abhängigkeiten von den Rohstoffen sind geringer und das Material wird als sicherer eingestuft. Es kommt hauptsächlich in Heimspeichern zum Einsatz, aber z. B. auch in Bussen. (Fichtner 2022, S. 5) Bereits seit 2020 setzen auch Automobilproduzenten wie Tesla und BYD das Material LFP in den Batterien ihrer Fahrzeuge ein (Hasan & Islam et al. 2023, S. 1; Rosenberger & Rosner et al. 2024, S. 1). Nachteilig ist die geringe Dichte des Materials, welches den Einsatz großer Volumina und somit einen großen Bauraum erfordert (Fichtner 2022, S. 5).

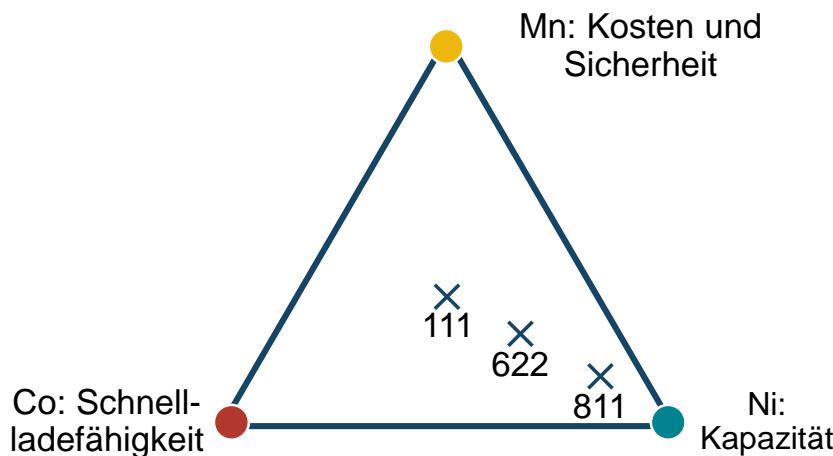


Abbildung 2-4 Eigenschaften der Komponenten des NMC und Entwicklung der Zusammensetzung nach (Börger & Wenzl 2023, S. 296)

Einen zusammenfassenden Vergleich der anfangs genannten Kathodenmaterialien bietet Tabelle 2-1. Aufgrund der hohen Energiedichte sind NMC und NCA eher in High-End-Automobil- und Consumer-Anwendungen zu finden (Börger & Wenzl 2023, S. 316).

Tabelle 2-1 Eigenschaften von ausgewählten Kathodenmaterialien entnommen aus (Börger & Wenzl 2023, S. 296)

	NMC111	LFP	NCA
Nutzbarer Spannungsbereich mit Graphit-Anode / V	2,5-4,2	2,0-3,6	2,5-4,2
Energiedichte / -	hoch	mittel	hoch
Zyklenfestigkeit / -	mittel	hoch	mittel
Sicherheit / -	niedrig	hoch	niedrig
Kosten / -	hoch	niedrig	hoch

Um die Abhängigkeit von den für LIB benötigten Rohstoffen zu minimieren, wird an völlig neuen Batteriezellchemien geforscht. Die sogenannten Post-Li-Systeme enthalten kein Li. Die meisten Post-Li-Systeme haben einen Technologie-Reifegrad (engl. Technology Readiness Level, kurz TRL) < 5 und befinden sich damit noch in der Entwicklung im Labormaßstab. Eine Ausnahme ist die NIB, die bereits kommerzialisiert wurde. Zuletzt kann auch die Abhängigkeit von natürlichem Graphit durch synthetisches Graphit minimiert werden. (Fichtner 2022, S. 6)

2.2.2 Natrium-Ionen-Batterie

Im Gegensatz zu den im vorherigen Abschnitt genannten Rohstoffen für LIB, ist Na in der Erdkruste im Überfluss vorhanden. Zusätzlich ist das Mineral Trona, aus dem Natrium-Carbonat hergestellt wird, knapp um das 33-fache günstiger als Lithium-Carbonat, aus dem Li für die LIB gewonnen wird. NIB haben daher insbesondere aufgrund der guten Verfügbarkeit und der geringen Rohstoffkosten das Potenzial, als Speicher eingesetzt zu werden. (Slater & Kim et al. 2013, S. 947)

Die NIB gestaltet sich im Aufbau ähnlich wie die LIB. Als Kathodenaktivmaterialien werden Na-basierte Metallschichtoxide und -fluorophosphate sowie Preußisch Blau und die entsprechenden Analoga eingesetzt. Auf der Anodenseite wird in der Regel Hard Carbon (HC) verwendet, wobei es auch Untersuchungen mit anderen Materialien gibt. (Abraham 2020, S. 3544) In Graphit ist die Einlagerungskapazität der Na-Ionen zu gering, weshalb Graphit für den Einsatz als Anode ungeeignet ist (Zhao & Hu et al. 2020, S. 1–2). Weiter kann auf der Anodenseite auf das Metall Kupfer (Cu) als Substrat verzichtet und durch das günstigere Al ersetzt werden, da es hier im Spannungsbereich von 0 bis 5 V nicht wie beim Li zur Bildung unerwünschter Legierungen kommt (Bauer & Song et al. 2018, S. 2). Auch durch den Verzicht von Co und Ni ist die NIB im Vergleich zu beispielsweise NMC nachhaltiger (Fichtner 2022, S. 7). Die NIB-Technologie wird insbesondere aus chemischer Sicht als Drop-In Technologie bezeichnet, da sich ihre chemischen Eigenschaften ähneln (Smith & Treacher et al. 2017, S. 13). Weiter wird davon ausgegangen, dass die gleichen bzw. ähnlichen Herstellungsprozesse eingesetzt werden können (Duffner & Kronemeyer et al. 2021, S. 127). Bisher wurde die Produzierbarkeit dieser neuen Materialsysteme überwiegend im Labormaßstab untersucht. Einflüsse, die bei der Produktion industrieller Mengen auftreten, sind weitestgehend unbekannt. (Klemens & Wurba et al. 2023, S. 1–2; Rudola & Rennie et al. 2021, S. 14–15) Die NIB wurde bereits von mehreren Unternehmen kommerzialisiert und u. A. 2021 durch den weltweit führenden Batteriezellhersteller CATL für den Einsatz in Fahrzeugen angekündigt. (Fichtner 2022, S. 6; Rudola & Rennie et al. 2021, S. 16) Die gravimetrische Energiedichte der heutigen NIB ist aktuell noch niedriger als die der LIB. So liegt die gravimetrische Energiedichte von LFP auf Zellebene mit ca. $200 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ höher als die der NIB von CATL, die laut Herstellerangaben eine gravimetrische Energiedichte von $160 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ aufweisen soll. Dies liegt unter anderem daran, dass das Na^+ -Ion größer und schwerer als das Li^+ -Ion ist und die Zellspannung niedriger als bei LIB ist. Daher müssen effizientere Wirtsstrukturen entwickelt werden. Ein viel verfolgtes

Wirtsmaterial für die Kathode ist beispielsweise das sogenannte Preußisch Weiß (engl. Prussian White), welches nicht toxisch und günstig ist. Die für 2022 angekündigte NIB von CATL sollte bereits eine gravimetrische Energiedichte von $200 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ liefern, welche vergleichbar mit LFP ist. Eine weitere, noch zu bewältigende Herausforderung ist die Zyklenstabilität, die momentan bei einer Restkapazität am Lebensende von 80 % bei etwa 1000 Zyklen liegt. Je nach Batteriezellchemie können LIB zwischen 2.000 und 3.000 Zyklen liefern. Ebenso ist der Kapazitätsverlust nach dem ersten Zyklus noch immer zu groß. Trotz der bisher ungelösten Herausforderungen kann die NIB auch einige Vorteile vorweisen. So bringt sie ein hohes Potenzial zur Schnellladefähigkeit mit sich und die Restkapazität bei niedrigen Temperaturen um -20°C liegt für NIB bei 90 %. NMC-Batterien kommen hier auf 70 % und LFP-Batterien sogar nur auf 60 %. Ein weiterer entscheidender Faktor sind die Kosten für eine Batterie, die im Vergleich zu NMC-Batterien um 40 % geringer geschätzt werden. Weiter können die NIB-Zellen nach Herstellerangaben aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften dichter gepackt werden, was eine Erhöhung der volumetrischen Energiedichte auf Batterie-Pack-Niveau bedeutet. (Fichtner 2022, S. 6–7)

Weitere vielversprechende Post-Li-Materialien sind Kalium, Magnesium und Al. Sie sind ebenfalls reichlich in der Erdkruste vorhanden und weisen eine konkurrenzfähige Energiedichte im Vergleich zu Li auf. (Li & Huang et al. 2019, S. 2032)

2.3 Allgemeiner Herstellungsprozess einer Batteriezelle

Die Herstellung einer Batteriezelle erfolgt nach einer komplexen Prozesskette, bei der jeder Prozessschritt die nachfolgenden Prozessschritte und somit die Produktqualität und die finale Zellperformance stark beeinflusst (Günther & Billot et al. 2016, S. 305; Westermeier & Reinhart et al. 2014, S. 14). Dabei wird die Prozesskette in die Produktionsabschnitte Elektrodenfertigung, Assemblierung und Aktivierung untergliedert (Kampker 2014, S. 61). Die Elektrodenfertigung und Assemblierung werden im Folgenden überblicksweise beschrieben, um den Prozessschritt des Kalandrierens einordnen zu können. Die Aktivierung ist für diese Arbeit nicht weiter relevant. Die Elektrodenfertigung ist für alle Batteriezellformate identisch, danach unterscheidet sich die Weiterverarbeitung bis zur fertigen Batteriezelle (Kampker 2014, S. 61). Im Folgenden wird lediglich auf die Herstellung der Pouch-Zelle eingegangen.

2.3.1 Elektrodenfertigung

Die Elektrodenfertigung untergliedert sich in die fünf Prozessschritte Mischen, Beschichten, Trocknen, Kalandrieren und Slitten (Kampker 2014, S. 61). Sie sind in Abbildung 2-5 schematisch als Prozesskette dargestellt.

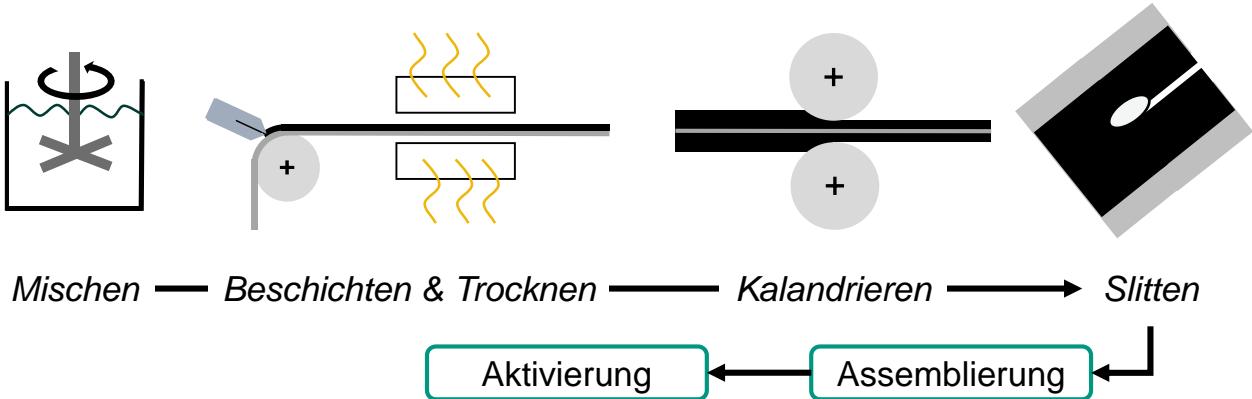


Abbildung 2-5 Einordnung der Prozessschritte der Elektrodenfertigung in die Prozesskette der Batteriezellfertigung in Anlehnung an (Korthauer & Pettinger 2013, S. 116)

Die Elektrodenfertigung beginnt mit dem Mischen der Ausgangsstoffe für die Beschichtung der Elektroden. Ziel ist dabei stets die Homogenisierung der festen und flüssigen Komponenten zu einem Slurry. Ein weiteres Ziel bei der Herstellung von Kathoden-Slurries ist die Etablierung eines Ruß-Netzwerks, welches die elektrische Kontaktierung der Aktivmaterialpartikel garantiert. In der Anode ist durch das Graphit bereits eine ausreichend gute Kontaktierung sichergestellt. (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 697–698) Forschungsseitig wie industriell ist das Mischen in Batches üblich. Eine Durchsatzsteigerung kann beispielsweise über Extrusionsprozesse erzielt werden, die sich am Markt erst noch etablieren müssen. (Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 25)

Der Slurry wird im Anschluss in einem kontinuierlichen Prozess auf beiden Seiten gleichzeitig oder nacheinander auf das Substrat aufgetragen. Als Schichtdicke wird überwiegend ein Wert um ca. 200 µm gewählt. Je nach Prozessroute bleibt ein Rand unbeschichtet, aus dem später die Ableitertabs gefertigt werden. Die Schicht wird entweder aufgerakelt oder mittels einer Schlitzdüse aufgetragen. (Kurzweil & Dietlmeier 2018, S. 228) Die Prozessierbarkeit des Slurries wird dabei maßgeblich durch die dynamische Viskosität des Slurries bestimmt und wird in Abhängigkeit des Auftragswerkzeugs eingestellt (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 698–699). Neben kontinuierlichen Bahnen werden auch diskontinuierliche bzw. intermittierte Bahnen beschichtet. Die zusätzlichen Start- und Stoppkanten stellen in der Beschichtungstechnik eine

Herausforderung dar, da ein falsch eingestelltes Fließverhalten zu unerwünschten Geometrieabweichungen führen kann. (Kaiser et al., 2014, S. 701)

Im nächsten Prozessschritt wird das Lösungsmittel durch die Zufuhr von Wärme und trockener Luft wieder entfernt und idealerweise zurückgewonnen und in den Prozess zurückgeführt. Der Trocknungsschritt erfolgt in Schwebebahn-, Saugstrahl- oder Rollenbahntrocknern. (Kurzweil & Dietlmeier 2018, S. 228) Dabei werden beliebig viele Trocknerabschnitte aneinander gereiht, die in der Regel unterschiedlich temperierbar sind. In Abhängigkeit von der Beschichtung werden die Atmosphäre und Temperaturen zwischen 80 °C und 180 °C gewählt. Optional kann eine Abkühlzone hinzugefügt werden. Die Länge der Trocknerstrecke ist von der Bahngeschwindigkeit abhängig. Bei einer hohen Bahngeschwindigkeit wird folglich eine größere Trocknerstrecke benötigt, sodass die Verweildauer zur vollständigen Lösungsmittelabfuhr ausreichend ist. (Kampker 2014, S. 64–65) Eine Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit bietet die Möglichkeit, größere Investitionen für längere Trocknerstrecken einzusparen und so die Kosten für eine Batteriezelle zu minimieren (Kumberg 2022, S. 6; Mauler & Duffner et al. 2021, S. 4719). Während der Trocknung stellt sich die Mikrostruktur der Beschichtung ein, die die elektrochemischen Eigenschaften der späteren Batteriezelle maßgeblich beeinflusst (Komoda & Ishibashi et al. 2023, S. 8).

Die trockene Elektrode wird anschließend dem Kalandrierprozess zugeführt. Die Bezeichnung entstammt dem französischen Wort „calandre“, was „Rolle“ bedeutet (Kurzweil & Dietlmeier 2018, S. 228). Das Kalandrieren wird industriell als kontinuierlicher Rolle-zu-Rolle Prozess ausgeführt (Kampker & Heimes 2024, S. 261). Die poröse Beschichtung wird in einem Walzprozess auf eine Zieldicke verdichtet (Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 172) Da sich die vorliegende Dissertation auf das Kalandrieren fokussiert, wird das Kalandrieren in Kapitel 2.4 ausführlich beschrieben.

Die kalandrierte Elektrode wird je nach späterem Batteriezellformat kontinuierlich mit Hilfe von Messern oder Lasern in Längsrichtung zugeschnitten, was auch als Slitting bezeichnet wird. Die entstehenden Wickel werden dann als Tochterrollen bezeichnet. (Korthauer & Pettinger 2013, S. 240)

Die zugeschnittenen Elektrodenwickel werden, wenn nicht bereits früher im Prozess geschehen, z. B. in einem Vakuumtrockenschränk gelagert, um die gesamte potenziell vorhandene Restfeuchte zu entfernen (Korthauer & Pettinger 2013, S. 240). Die im Elektrolyt enthaltenen Leitsalze können mit Wasser zu korrosivem Fluorwasserstoff

reagieren, welcher die Materialien schädigt und zur beschleunigten Zellalterung führt. Aus diesem Grund ist das Vakuumtrocknen unerlässlich und im Anschluss können die Elektroden ausschließlich unter Trockenraumbedingungen mit einem Taupunkt von etwa - 50 °C weiterverarbeitet werden. (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 703–704)

Die spätere Performance der Batteriezelle wird maßgeblich durch die bis hier genannten Prozessschritte eingestellt. So werden beispielsweise die Porosität, die Binder- und Leitrußverteilung, die Beladung sowie der Kontakt zwischen den Partikeln und dem Substrat beeinflusst. (Günther & Billot et al. 2016, S. 306)

2.3.2 Assemblierung

Die Assemblierung umfasst den Zusammenbau aller Komponenten, das Verpacken sowie zuletzt die Befüllung mit Elektrolyt (Kampker 2014, S. 20). Die Prozessschritte sind in Abbildung 2-6 schematisch dargestellt.

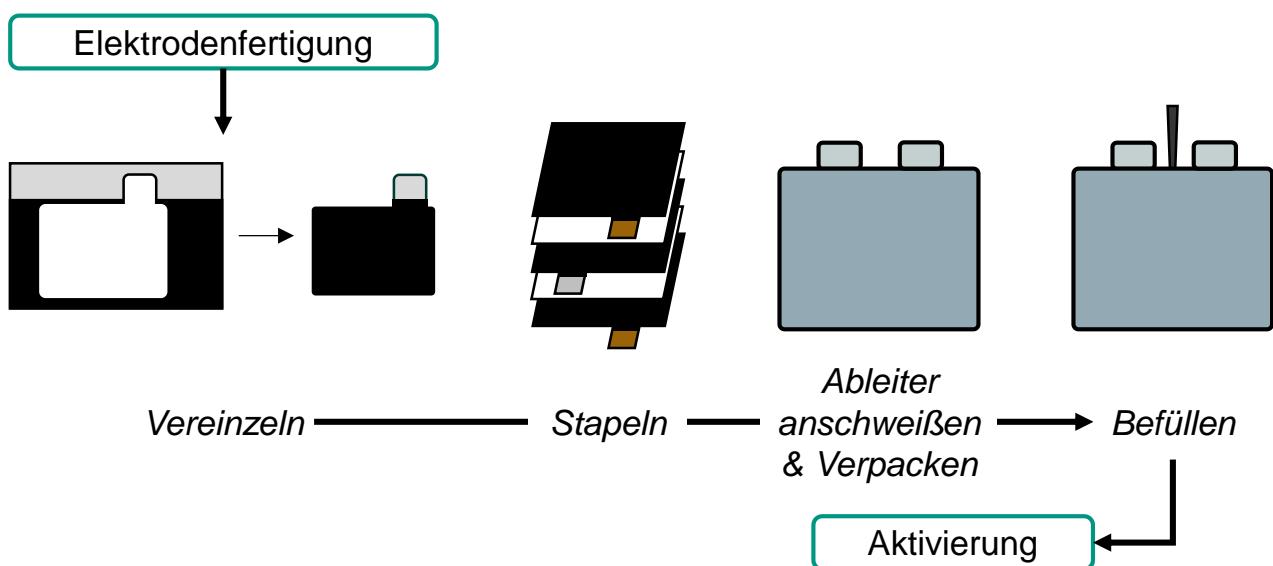


Abbildung 2-6 Einordnung der Prozessschritte der Assemblierung in die Prozesskette der Batteriezellfertigung in Anlehnung an (Kampker 2014, S. 20)

Dieser Prozessabschnitt unterscheidet sich für die verschiedenen Batteriezelltypen. Die Anoden, Kathoden und Separatoren der Rundzelle und der prismatischen Zelle werden in Wickelprozessen zu einer sogenannten Jelly Roll zusammengeführt (Korthauer & Pettinger 2013, S. 241). Für Pouch-Zellen ist das sogenannte Z-Falten gängig, bei dem die Elektroden dem Prozess magaziniert in Einzelblättern zugeführt werden, während der Separator als kontinuierliches Band verarbeitet wird. Die Einzelblätter werden abwechselnd auf dem Separator abgelegt und vom Separator umschlungen. Hat der Elektroden-Separator-Verbund (ESV) seine Zielblattzahl erreicht, so wird der Separator

abgetrennt und der Stapel wird mit Klebebändern versehen, die den Stapel fixieren und vor dem Verrutschen bewahren. (Schmitt & Posselt et al. 2015, S. 271) Ein alternatives Stapelbildungskonzept ist das Einzelblattstapeln, bei dem auch der Separator als Einzelblatt vorliegt (Korthauer & Pettinger 2013, S. 241). Während der Wickel- und Stapelprozesse werden die Elektroden und der Separator mechanischen Belastungen wie Zug, Druck und Biegung ausgesetzt, was die Haftung zwischen Beschichtung und Substrat negativ beeinflussen kann (Schilling & Schmitt et al. 2016, S. 1502). Der ESV wird so aufgebaut, dass sich alle Ableitertabs der Anoden und alle Ableitertabs der Kathoden exakt übereinander befinden (Korthauer & Pettinger 2013, S. 225–226). Die Anoden- und Kathoden-Ableitertabs werden verschweißt und mit je einem Ableiterblech verbunden. Über die Ableiter wandern später die Elektronen. Für den Schweißprozess bietet sich das Laserschweißen an. (Grabmann & Kriegler et al. 2022, S. 2571) Ultraschallschweißen ist ein etabliertes Verfahren, wobei der Energieeintrag durch Ultraschall zu Materialermüdung führen kann (Shawn Lee & Hyung Kim et al. 2013, S. 1, 12–13).

Die Pouch-Verpackung setzt sich aus zwei Halbschalen zusammen, die im Tiefziehprozess aus Al-Kunststoff-Verbundfolien gefertigt werden. Dabei wird eine Gastasche vorgesehen, um die bei der späteren Aktivierung entstehenden Gase aufnehmen zu können. Sie wird nach der Aktivierung abgetrennt. Die Halbschalen werden mittels Heißsiegeln gefügt. (Korthauer & Pettinger 2013, S. 228)

Über eine Dosierlanze wird der Elektrolyt in mehreren Befüllschritten in die Pouchbag injiziert, bis die Batteriezelle vollständig gefüllt ist (Knoche & Zinth et al. 2016, S. 275). Die Zelle wird im Anschluss über mehrere Stunden gelagert, um eine homogene Verteilung des Elektrolyts zwischen allen Lagen zu garantieren (Birke & Weeber et al. 2022, S. 11).

2.4 Kalandrieren

Im Folgenden werden alle Grundlagen zum Prozessschritt des Kalandrierens erläutert. Weiter wird der Stand der Forschung und Technik zu den mechanischen Eigenschaften der Elektroden unter Berücksichtigung des Kalandrierens detailliert dargelegt.

2.4.1 Industrielle Anwendungen von Kalander

Kalander werden in vielen verschiedenen Industriezweigen eingesetzt. Bekannt ist der Prozess insbesondere in der Papierherstellung, der Verarbeitung von Linoleum, Gummi

und anderen Polymeren sowie in der Stahl- und Al-Industrie. Das Walzgut unterscheidet sich dabei stark in seinen Eigenschaften. (Gaskell 2021, S. 334)

Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften und Anwendungsbereiche variieren auch die Anforderungen und somit die Bauformen für Kalander.

Für die Herstellung von technischen Gummiproducten werden, wie in Abbildung 2-7 schematisch und beispielhaft dargestellt, überwiegend Dreiwalzen-Kalander eingesetzt (Röthemeyer 2013, S. 633).

Im Gegensatz dazu werden in der Blechproduktion, also beim Warm- und Kaltwalzen, vorwiegend sogenannte Quarto- oder Tandem-Gerüste eingesetzt. Der Vorteil dieser Bauformen ist der geringe Durchmesser der Arbeitswalze und somit ein verminderter Walzdruck, was mit einer reduzierten Belastung auf Walze und Gerüst einhergeht. Die resultierende, verminderte Biegesteifigkeit würde eine Durchbiegung der Walzen und somit inhomogene Bleche nach sich ziehen, weshalb die Walzen durch andere Walzen abgestützt werden. Die abstützenden Walzen werden nicht angetrieben. Bei einem geringen Walzdruck können daher auch Duo-Gerüste eingesetzt werden. (Arendes 2023, S. 39–40) In Abbildung 2-7 sind die beiden Walzgerüste schematisch dargestellt.

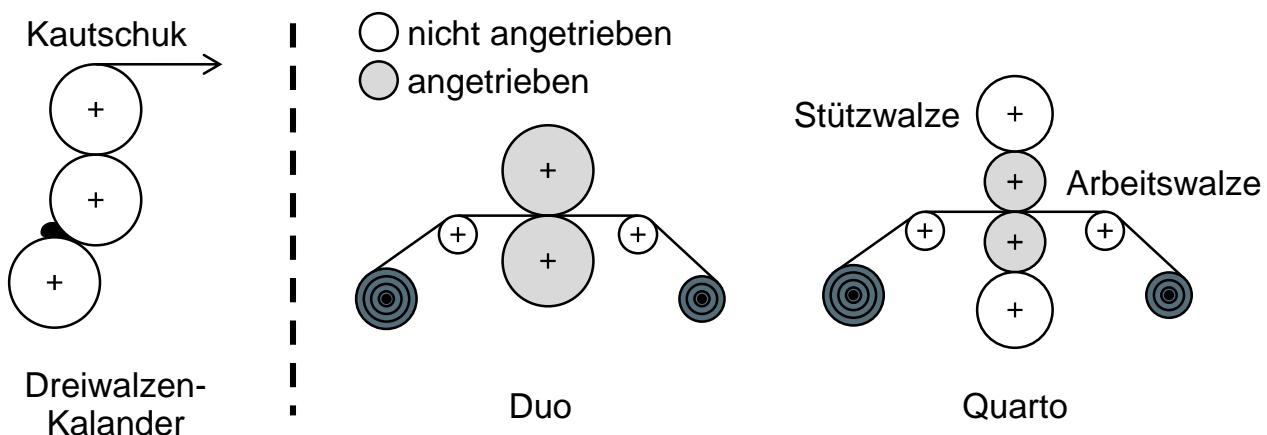


Abbildung 2-7 Dreiwalzen-Kalander in der Kautschukverarbeitung in Anlehnung an (Röthemeyer 2013, S. 634) und Walzgerüste in der Blechverarbeitung in Anlehnung an (Arendes 2023, S. 40)

Kalander für die Bearbeitung von Batterieelektroden kommen dem Duo-Gerüst für das Walzen von Metall am nächsten, da die Walzkräfte im Vergleich zur Metallbearbeitung geringer sind. Beim Walzen von Stahl treten Linienlasten von über $7.000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ auf (Devadas & Baragar et al. 1991, S. 330; Mahmoodkhani & Wells et al. 2017, S. 284). Der in dieser Arbeit verwendete Kalander wird in Kapitel 4.1.1 vorgestellt.

2.4.2 Beschreibung des Walzprozesses

Walzverfahren werden dem Druckumformen zugeordnet, bei dem Druckspannungen zur plastischen Verformung führen. Die Kraft wird dabei über sich drehende Walzen aufgebracht, die angetrieben sein können, oder die durch das sich bewegende Walzgut mitgeschleppt werden. (Fritz & Schmütz 2022, S. 154–155) Das Walzgut wird durch Reibschluss zwischen dem Walzenpaar hindurch gefördert (Overhagen 2018, S. 24). Im Folgenden wird das Prinzip des Flach-Längswalzens in der Walzstahlproduktion genauer erläutert, da dieser Prozess dem Kalandrieren von Batterieelektroden am ähnlichsten ist. Die Batterieelektrode ist, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, anders als das Stahlwalzgut, ein inhomogenes Material. Obwohl dieser Unterschied bei der Auslegung von Walzwerken berücksichtigt werden muss, bietet die im Folgenden beschriebene Walztheorie dennoch einen ausreichend guten Einblick in die sich im Walzspalt abspielenden Mechanismen.

Das Walzgut wird senkrecht zu den Walzenachsen und ohne Drehung durch den Walzspalt geführt. Dabei haben die Walzen an der Berührungsfläche mit dem Walzgut eine zylindrische oder kegelige Form. (Lange 1988, S. 179–180)

Abbildung 2-8 zeigt die Verhältnisse im Walzspalt beim Flach-Längswalzen. Der Walzspalt wird durch die Ein- und Auslaufebenen sowie durch die Walzgutbreite b_{WG} begrenzt. Die Einlaufpunkte Y_E und Auslaufpunkte Y_A an beiden Walzen mit Radius R spannen parallel zur xz-Ebene die Ein- und Auslaufebenen auf. Als Walzenöffnung wird der geringste Abstand zwischen den beiden Walzen bezeichnet. Dieser befindet sich in der Auslaufebene. Der sogenannte Walzensprung ist eine Vergrößerung der Walzenöffnung, wenn das Walzgut durch den Walzspalt gefördert wird. Er ist eine Folge von Nachgiebigkeiten im Walzgerüst. Das Walzgut tritt mit einer Einlaufgeschwindigkeit v_e und einer Einlaufhöhe h_e in den Walzspalt ein und verlässt diesen mit der Auslaufgeschwindigkeit v_a und der Auslaufhöhe h_a . Dabei gilt für die Höhe des Walzguts h_{WG} in Abhängigkeit des betrachteten Winkels δ

$$h_{WG} = h_a + 2R(1 - \cos \delta). \quad 2-1$$

(Fritz & Schmütz 2022, S. 159–160; Lange 1988, S. 181–182)

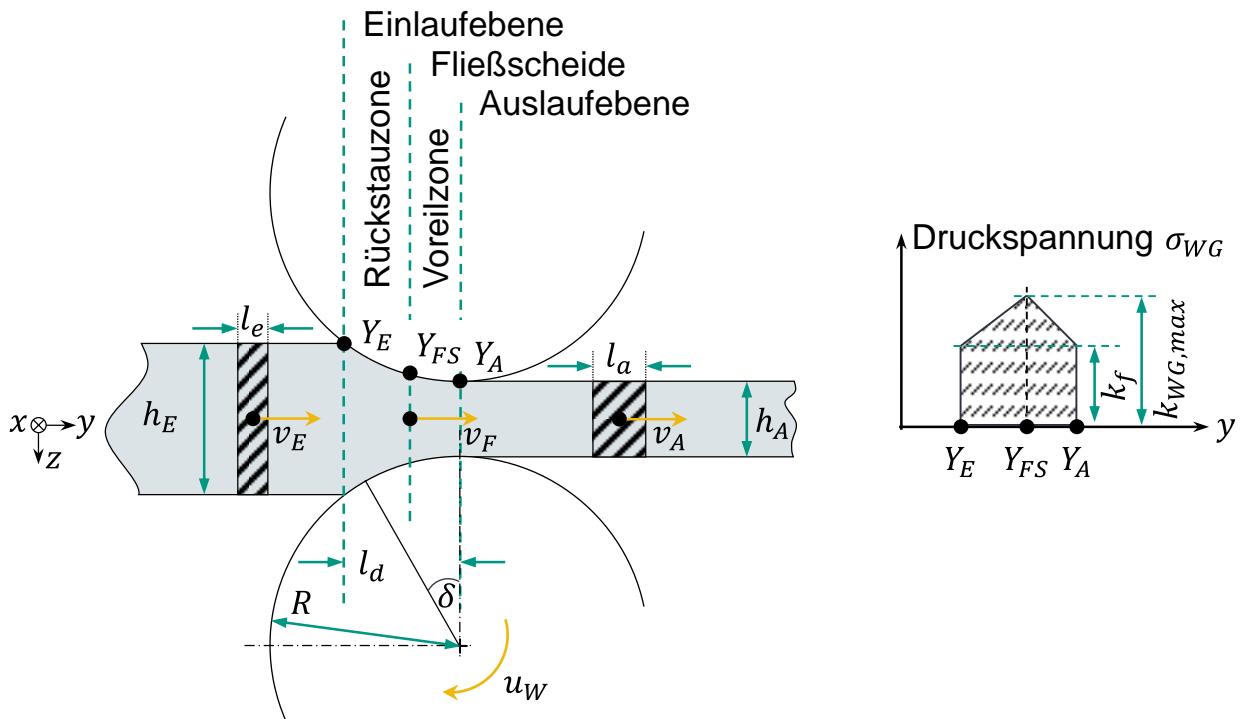


Abbildung 2-8 Geometrische und kinematische Verhältnisse im Walzspalt nach der elementaren Walztheorie in Anlehnung an (Fritz & Schmütz 2022, S. 159–162; Lange 1988, S. 181–189)

Die Abnahme der Höhe hat somit aufgrund der Massenerhaltung eine Breitung und Längung des Walzgutes zur Folge (Lange 1988, S. 182). Ein definierter Abschnitt des Walzgutes vor der Einlaufebene mit der Länge l_e hat nach dem Austritt aus der Auslaufebene die Länge l_a mit $l_a > l_e$ (Fritz & Schmütz 2022, S. 162).

Die Walzen drehen sich gegensinnig mit der Umfangsgeschwindigkeit u_w . Für die Geschwindigkeitskomponente in Laufrichtung $u_{w,y}$ gilt $u_{w,y} = u_w \cos \delta$. Die Punkte Y_{FS} an beiden Walzen spannen in der xz-Ebene die Fließscheide auf. Lediglich in dieser Ebene entspricht die Geschwindigkeit des Walzguts v_{WG} der Umfangsgeschwindigkeit der Walzen und es gilt $v_{WG} = v_{FS} = u_{w,y}$. Vor dem Eintritt in die Fließscheide gilt für die Walzgutgeschwindigkeit $v_e < v_{WG} < v_{FS}$. Somit wird diese Zone als Rückstauzone bezeichnet. Zwischen der Fließscheide und der Auslaufebene befindet sich die Voreilzone, denn es gilt $v_{FS} < v_{WG} < v_a$. (Fritz & Schmütz 2022, S. 160; Lange 1988, S. 182)

Die gedrückte Länge l_d beschreibt die projizierte Bogenlänge $\overline{Y_E Y_A}$ und wird auch als Länge der Umformzone bezeichnet. Die Fläche $A_d = l_d \cdot b_{WG}$ entspricht somit der Projektion der Berührungsfläche zwischen Walzgut und Walzenoberfläche. Die Breite des Walzguts b_{WG} wird für diesen Zusammenhang aus der Einlaufbreite und der Auslaufbreite gemittelt. Das Diagramm im rechten Teil von Abbildung 2-8 zeigt den Verlauf der

Druckspannung im Walzspalt σ_{WG} . In der Ein- und Auslaufebene liegt die Fließspannung k_f an. Aufgrund der Reibung zwischen dem Walzgut und der Walzenoberfläche steigt die Druckspannung bis zur Fließscheide auf ihr Maximum $k_{WG,max}$ an, die auch als maximaler Umformwiderstand bezeichnet wird. Die bisher beschriebenen Verhältnisse beziehen sich auf die sogenannte elementare Walztheorie, für die ein Verhältnis $\frac{b_{WG}}{l_d} \geq 20$ angenommen wird und bei dem die Breitung des Walzguts vernachlässigbar klein ist. In der Realität hat die Reibung insbesondere beim Warmwalzen einen deutlichen Einfluss auf die Kinematik des Stoffflusses, sodass der Stofffluss des Walzgutes inhomogen verläuft. Dies hat zur Folge, dass statt einer scharf abgegrenzten Fließscheide eher von einer Haftzone ausgegangen werden muss, in der für die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Walzgut und der Walzenoberfläche $v_{rel} = 0$ gilt. Ein gemessener und somit realer Druckspannungsverlauf zeigt daher statt der idealen Spitze eine Rundung für den maximalen Umformwiderstand. Die Zonen vor und nach der Haftzone werden entsprechend als Gleitzonen bezeichnet. Die in z-Richtung wirkende, resultierende Kraft aus den Normalspannungen wird als Walzkraft F_W bezeichnet. Für sie gilt der Zusammenhang 2-2, wobei für σ_{WG} die mittlere Druckspannung angenommen wird.

$$F_W = A_d \cdot \sigma_{WG}$$

2-2

(Fritz & Schmütz 2022, S. 160–162; Lange 1988, S. 189)

Analoge Theorien zu den Verhältnissen im Walzspalt finden sich auch in der Kunststoffverarbeitung (Kopsch 1978, S. 4–21).

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 dargestellt, besteht die Beschichtung einer Elektrode aus einem Verbund aus unterschiedlichen Partikeln und einem Polymer-Binder, der während des Walzprozesses verdichtet wird. Somit laufen Partikelbewegungen in der Beschichtung ab. Zur Ergänzung der vorher eingeführten Walztheorie für Stahl wird im Folgenden ein kurzer Einblick in die Theorie der Verdichtung von Pulvern zwischen einem Walzenpaar gegeben.

Es werden drei Zonen unterschieden, die Gleit- oder Eintrittszone, die Verdichtungszone und die Austrittszone. In der Eintrittszone sind die wirkenden Druckkräfte noch relativ gering, sodass es lediglich zu ersten Umordnungsprozessen der Partikel kommt. In dieser Zone ist die Reibung der Partikel an den Walzenoberflächen dafür verantwortlich, dass das Pulver eingezogen wird. Als Verdichtungszone wird der Abschnitt

definiert, für welchen die Geschwindigkeit der Partikel an der Walzenoberfläche der Umlaufgeschwindigkeit der Walzen entspricht. Mit der Zunahme des Drucks werden die Zwischenräume schließlich geschlossen und die Dichte erhöht. Dabei haben Form und Größe der Partikel einen entscheidenden Einfluss auf die Bewegung der Partikel. So weisen sphärische Partikel bereits zu Beginn eine hohe Packungsdichte auf und die Verschiebungen fallen somit geringer aus. Eine weitere Erhöhung der Druckkräfte führt zur plastischen Verformung der Partikel, wobei die Anzahl der Kontaktpunkte und Bindungsstellen weiter erhöht wird. Anschließend kommt es zur Partikelfragmentierung, welche das Zerbrechen der Partikel beschreibt. Neue Oberflächen stellen weitere potenzielle Bindungsstellen bereit. Treten plastische Verformung und Fragmentierung gleichzeitig auf, so entstehen neue Bindungen. Die Austrittszone beginnt, sobald der Spalt wieder breiter wird. (Guigon & Simon et al. 2007, S. 258–259; Herrmann 1973, S. 42; Parikh 2005, S. 162)

2.4.3 Kalandrieren von Elektroden

Im Folgenden werden zunächst einige wichtige Begrifflichkeiten eingeführt. Darauf aufbauend werden anschließend die ablaufenden Mechanismen während des Kalandrierens erläutert sowie ein Überblick über die Einflüsse der Prozessgrößen auf die Verdichtung gegeben. Weiter werden die Einflüsse auf die Materialeigenschaften genannt. Die Abhängigkeit der elektrochemischen Eigenschaften wird in diesem Kapitel lediglich überblicksweise dargestellt, da sie für diese Arbeit eine untergeordnete Rolle spielen. Die Zusammenhänge zwischen dem Kalandrieren und den mechanischen Eigenschaften sind für diese Arbeit von großer Relevanz, weshalb diesen das Unterkapitel 2.4.4 gewidmet wird.

2.4.3.1 Einführung wichtiger Grundbegriffe

Im Kontext der Batterieproduktion werden poröse Elektroden durch das Aufbringen einer Kraft durch ein Walzenpaar verdichtet, was auch als Kalandrieren bezeichnet wird. (Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 172) Auf die Elektrode wirkt dabei die sogenannte Linienlast q_L , die, wie in Formel 2-3 dargestellt, den Quotienten aus der Walzkraft F_W und der Beschichtungsbreite b_B beschreibt (Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 174). Analog zu Kapitel 2.4.2 entspricht die Beschichtungsbreite b_B der gemittelten Breite des Walzguts b_{WG} unter der Annahme, dass die Beschichtungsbreite über den Kalandrierprozess hinweg nahezu konstant bleibt.

$$q_L = \frac{F_W}{b_B} \quad 2-3$$

Die Linienlast kann entweder direkt vorgegeben werden oder ist eine Resultierende des Spaltabstands (Meyer & Kosfeld et al. 2018, S. 371).

Das Hauptziel des Kalandrierens ist die Steigerung der volumetrischen Energiedichte, die mit einer Reduktion der Porosität bzw. mit einer Erhöhung der Dichte der Elektrode einhergeht (Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 172). Die Porosität Φ lässt sich anhand des Zusammenhangs 2-4 beschreiben (Günther 2023, S. 21).

$$\Phi = 1 - \frac{M \cdot \left(\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{p_3}{\rho_3} \right)}{d_B} \quad 2-4$$

Dabei entspricht der Quotient $M = \frac{m_B}{A_P}$ dem Flächengewicht, bestehend aus der Masse der Beschichtung m_B pro Probenfläche A_P . Die Dicke der Beschichtung wird als d_B bezeichnet. Die prozentualen Anteile des Aktivmaterials, des Binders und der Additive an der Beschichtung werden als p_n , $n = 1,2,3$ bezeichnet. Die realen Dichten der einzelnen Komponenten gehen über ρ_n , $n = 1,2,3$ ein.

In der Anwendung ist die Berechnung der Dichte der Beschichtung ρ_B über die Masse der Beschichtung, die Probenfläche und die Dicke der Beschichtung, wie in Formel 2-5 gezeigt, pragmatischer. Unter der Voraussetzung, dass sich die Dicke der Stromsammelfolie nicht bzw. weniger als die Messunsicherheit der Dickenmessung ändert, gilt der Zusammenhang 2-5 analog für die gesamte Elektrode. Um die Masse der Elektrode m_E zu erhalten, muss noch die Masse m_S des Substrats addiert werden, sodass $m_E = m_S + m_B$ gilt. Gleiches ergibt sich für die Dicke der Elektrode $d_E = d_B + d_S$.

$$\rho_B = \frac{m_B}{A \cdot d_B} \quad 2-5$$

(Haselrieder & Ivanov et al. 2013, S. 61)

Dichte und Porosität der Beschichtung stehen in dem in Formel 2-6 abgebildeten linearen Zusammenhang. Die physikalische Dichte ρ_{ph} ist dabei der Mittelwert aus den physikalischen Dichten der einzelnen Komponenten bzw. der Komposition, die mithilfe spezieller Verfahren gemessen werden können.

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_{ph}} \quad 2-6$$

(Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 174)

Übliche Dichten und Linienlasten für Standard-Anoden und -Kathoden bei Walzen-durchmessern zwischen 600 und 1000 mm sind Tabelle 2-2 zu entnehmen (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293).

Tabelle 2-2 Typische Dichten vor und nach dem Kalandrieren sowie zugehörige Linienlasten nach (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293)

	$\rho_{unkal} / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\rho_{kal} / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$q_L / \text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$
Graphit-Anoden	0,9 - 1,2	1,4 - 1,7	> 500
NMC-Kathoden	2,2 - 2,6	2,8 - 3,4	> 1000

Eine weitere pragmatische Angabe ist die Verdichtung Π . Sie berechnet sich aus den Dichten der Beschichtung vor ($\rho_{B,unkal}$) und nach dem Kalandrieren ($\rho_{B,kal}$).

$$\Pi = 1 - \frac{\rho_{B,unkal}}{\rho_{B,kal}} \quad 2-7$$

(Haselrieder 2017, S. 76)

2.4.3.2 Einfluss der Prozessgrößen auf den Verdichtungsprozess und die Elektrodeneigenschaften

Nach dem Beschichten und Trocknen ist die Leitfähigkeit innerhalb der Beschichtung häufig noch nicht ausreichend ausgeprägt, da nicht genügend Kontakte zwischen den Aktivmaterialpartikeln und den Leitadditiven bestehen. Die Anzahl der Partikel-Partikel-Kontakte wird durch das Kalandrieren erhöht, was schematisch in Abbildung 2-9 zu sehen ist. (Gulbinska 2014, S. 66) (Zheng & Tan et al. 2012) führen die Dickenreduktion hauptsächlich auf die Komprimierung der inaktiven Komponenten zurück, da sie in den untersuchten NMC111-Kathoden keine Deformation oder Beschädigung der Aktivmaterialien feststellen konnten. Allerdings verwenden sie Elektroden mit einem NMC-Gehalt von lediglich 85 %. (Zheng & Tan et al. 2012, S. 54) Die Partikelgröße der Aktivmaterialien schränkt die theoretisch mögliche Verdichtung ein. Bei einer weiteren Erhöhung der Linienlast kommt es zu einer starken Verformung der Elektroden und zu einem Eindrücken der Partikel in das Substrat. (Rauscher 2014, S. 102–103)

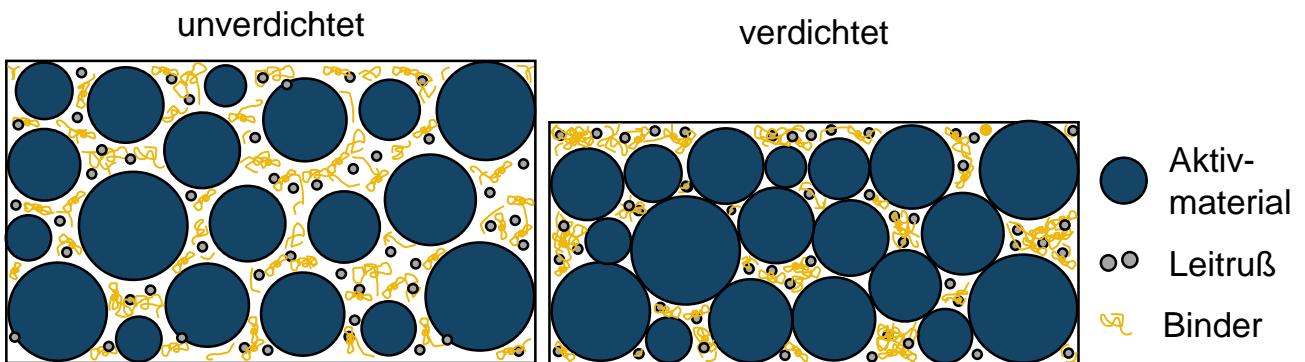


Abbildung 2-9 Schematische Darstellung der Beschichtung vor und nach dem Kalandrieren in Anlehnung an (Meyer & Kosfeld et al. 2018, S. 374)

Die Dichte steigt linear mit der Verdichtung an und gleichzeitig nimmt die Dicke der Beschichtung linear ab (Haselrieder & Ivanov et al. 2013, S. 63). Weiterführende Untersuchungen zeigen allerdings einen exponentiellen Zusammenhang zwischen der Linienlast q_L und der Dichte der Beschichtung ρ_B . In einer Studie mit NMC-Kathoden und Graphit-Anoden zeigt sich ein Unterschied zwischen Kathoden und Anoden, da Kathoden einen größeren Widerstand gegen Verdichtung γ_B aufweisen als Anoden. Gleichzeitig bringen die Graphitpartikel durch ihre Struktur ein größeres Porenvolumen mit, wodurch sie leichter zu verdichten sind. Bei vergleichbarer Verdichtung müssen für Kathoden daher größere Linienlasten eingestellt werden. Die Ursache liegt zum einen in den deutlich härteren NMC-Partikeln im Vergleich zu Graphit. In Kombination mit Reibung müssen für die Verschiebung der in Kontakt stehenden Partikel größere Kräfte aufgewendet werden. Einen weiteren Einfluss auf den Widerstand gegen Verdichtung haben auch die Zusammensetzung der Beschichtung sowie die Partikelmorphologie und die Partikelgrößenverteilung. (Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 174–176) Beide Elektroden zeigen durch den exponentiellen Zusammenhang auch eine Sättigung bei hohen Linienlasten in Richtung der maximalen Dichte (Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 178).

(Meyer & Kosfeld et al. 2018) führen die in Formel 2-8 dargestellte Modellgleichung zur Vorhersage der durch das Kalandrieren erreichbaren Porosität ein. Dabei sind Φ_0 die initiale Porosität und φ der Verdichtungsfaktor, welcher aus dem Quotienten aus minimal erreichbarer Porosität Φ_{min} und initialer Porosität berechnet wird.

$$\Phi = \Phi_0(\varphi + (1 - \varphi))\exp(-\frac{q_L}{\gamma_B}), \text{ mit } \varphi = \frac{\Phi_{min}}{\Phi_0} \quad 2-8$$

(Meyer & Kosfeld et al. 2018, S. 373–375)

In einer Studie mit NMC111-Kathoden wird ein negativer linearer Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsfaktor φ und der Temperatur der Kalanderwalzen beobachtet, da eine geringere minimale Porosität bei gleicher Linienlast erzielt werden kann. Somit sinkt auch der Verdichtungswiderstand γ_B . Ursache ist der aufgrund der erhöhten Temperatur sinkende E-Modul und die damit einhergehende verbesserte Deformierbarkeit des enthaltenen thermoplastischen PVDF-Binders. Gleichzeitig wird die interpartikuläre Reibung bei der Umordnung der Partikel vermindert. (Meyer & Weyhe et al. 2020, S. 3–5)

Der Walzendurchmesser beträgt üblicherweise 600 – 1000 mm. Große Walzendurchmesser verlängern die Umformzone, wodurch geringere Linienlasten nötig sind. Besonders bei dicken Elektroden ist dies von Vorteil, da diese für Fehler durch Überlastung besonders anfällig sind. (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293) Bei gleicher Linienlast kann mit einem geringeren Walzendurchmesser eine höhere Verdichtung erzielt werden, da die Eingriffsfläche geringer ist (Wang & Wang et al. 2024, S. 5). 30 – 100 m·min⁻¹ sind typische Geschwindigkeiten bei der industriellen Verarbeitung, wobei die Geschwindigkeit dabei keinen signifikanten Einfluss auf die Dichte aufzuweisen scheint. Die Diktentoleranz beträgt üblicherweise $\pm 2 \mu\text{m}$. (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293; Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 174–175)

Neben der Verbesserung der Leitfähigkeit sorgt das Kalandrieren auch für eine Reduktion der Oberflächenrauigkeit sowie für die Steigerung der Energie- und Leistungsdichte (Haselrieder & Ivanov et al. 2013, S. 59). So zeigen beispielsweise Li/LFP-Zellen höhere Kapazitäten bei höheren Entladungsraten für kalandrierte Elektroden im Vergleich zu unkalandrierten Elektroden (van Bommel & Divigalpitiya 2012, S. A1795). Bei Untersuchungen mit NMC111-Kathoden wird beobachtet, dass das Kalandrieren die Entladekapazität bei höheren C-Raten bis zu einer bestimmten Verdichtungsrate verbessert. Eine höhere Verdichtung kann zum Brechen der Partikel führen und die Kapazität bei hohen C-Raten einschränken. Im Gegensatz zu (Zheng & Tan et al. 2012) liegt der NMC-Gehalt hier bei 94 %. (Kang & Lim et al. 2017, S. 2) Der Einfluss der Kalandrierung auf die elektrochemischen und mechanischen Eigenschaften unterscheidet sich deutlich für Anode und Kathode, weshalb der Prozess entsprechend dem Material eingestellt werden muss. (Meyer & Kosfeld et al. 2018, S. 371)

In der Literatur sind einige hochkomplexe, simulative Ansätze zu den Partikelbewegungen sowie zu den Verdichtungsvorgängen auch im Hinblick auf die elektrochemischen Eigenschaften zu finden (Ngandjong & Lombardo et al. 2021; Sangrós Giménez &

Finke et al. 2019). Die Beschreibung dieser Studien überschreitet jedoch den Rahmen dieser Arbeit, weshalb im Folgenden auf die Literatur verwiesen wird.

Beim Kalandrieren wird lediglich der beschichtete Teil der Elektrode von dem Walzenpaar erfasst. Der unbeschichtete Randbereich wird nicht mit verdichtet und erfährt somit auch keine Belastung durch den Verdichtungsprozess. (Bold 2023, S. 43–44) Dies führt zu einer Längung des beschichteten Teils der Elektrode, bei gleichbleibendem unbeschichteten Substratrand, was Eigenspannungen in der Elektrode hervorruft (Günther 2023, S. 59). Auch Dehnungsmessungen an kalandrierten Kathoden bestätigen diese Vermutung und zeigen deutlich, dass das unbeschichtete Substrat keine Dehnung erfährt. Weiter kann an einseitig beschichteten Elektroden nachgewiesen werden, dass auch das Substrat unter der Beschichtung eine Dehnung erfährt. Diese ist ähnlich groß wie die Dehnungen, welche an der Beschichtungsoberfläche gemessen werden. (Mayer & Wurba et al. 2021, S. 10–11) Messungen an NMC-Kathoden bestätigen, dass die Beschichtung und das dazwischen liegende Substrat signifikant gelängt werden. Für die Messung der Längung des Substrats wird die Beschichtung entfernt. Es werden leichte Differenzen zwischen der Substratlänge und der Länge der Gesamtelektrode festgestellt. (Wang & Wang et al. 2024, S. 11)

2.4.4 Einfluss des Kalandrierens auf die mechanischen Eigenschaften

Stellen sich ungünstige mechanische Eigenschaften der Elektrode ein, so kann dies zu Problemen bei der Ausrichtung der Elektrode für die folgenden Handhabungs- und Weiterverarbeitungsprozesse führen. (Günther & Billot et al. 2016, S. 306) Es ist daher von großer Bedeutung, die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den mechanischen Eigenschaften zu kennen, um sie gezielt beeinflussen zu können. Weiter bieten die mechanischen Eigenschaften einer Elektrode aufgrund ihrer Messbarkeit unabhängig von ihrer Zusammensetzung die Möglichkeit, Elektroden in ihrem Verhalten untereinander zu vergleichen. Im Folgenden wird daher detaillierter auf die Biege-eigenschaften sowie die Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat eingegangen, da diese Größen in der Literatur bereits für Elektroden untersucht wurden. Zunächst werden die Kenngrößen jeweils kurz eingeführt und anschließend werden bereits gefundene Zusammenhänge erläutert.

2.4.4.1 Biegeverhalten

In der Literatur sind unterschiedlichste Prüfmethoden zur Untersuchung des Biegeverhaltens von Komponenten einer Batteriezelle bekannt, die im Folgenden erläutert werden.

(Gupta & Üçel et al. 2020) führen sogenannte U-förmige Biegeversuche an einseitig beschichteten NMC622-Kathoden durch. Aufgrund des Versuchsaufbaus wird die Beschichtung der Proben auf Zug beansprucht, wenn das Substrat außen liegt, und auf Druck, wenn die Beschichtung innen liegt. Mit dieser Methode ist es möglich, die E-Moduln bei Zug- und Druckbeanspruchung zu berechnen. Die E-Moduln bei Druckbelastung sind deutlich größer als bei Zugbelastung. Dies wird auf die Bildung neuer Partikel-Partikel- und Partikel-Binder-Kontakte während der Druckbelastung zurückgeführt, die eine Zunahme der Steifigkeit verursachen. (Gupta & Üçel et al. 2020, S. 851–852) Weiterführende Untersuchungen an Graphit-Anoden mit dem gleichen Prüfaufbau zeigen, dass der E-Modul bei Druckbelastung mit zunehmender Biegedehnung ebenfalls steigt. Dieser Effekt wird auch der Mikrostrukturänderung zugeordnet. Für die Zugbelastungen werden keine Änderungen des E-Moduls beobachtet. (Üçel & Gupta et al. 2022, S. 4–5)

(Noelle & Wang et al. 2018) zeigen die Ergebnisse von Dreipunktbiegeversuchen an verschiedenen Lithium-Kobalt-Oxid (LCO)-Kathoden und Graphit-Anoden. Es werden Kathoden und Anoden mit porösem Al bzw. Cu als Substrat hergestellt, die anschließend auf eine Dicke von 600 µm kalandriert werden. Als Referenz werden kommerzielle LCO-Kathoden und Graphit-Anoden mit einer Dicke von 57,5 µm bzw. 67,5 µm auf jeder Seite und konventionellen Substraten geprüft. Die Elektroden mit den porösen Substraten und der großen Dicke zeigen eine um etwas mehr als 10-fach höhere Biegesteifigkeit. Dies zeigt die Relevanz der Elektrodendicke hinsichtlich der Biegesteifigkeit auf. (Noelle & Wang et al. 2018, S. 129–130)

Auch (Günther 2023) führt Dreipunktbiegeversuche an NMC111-Kathoden durch. Es wird gezeigt, dass eine zunehmende Massenbeladung sowie eine Erhöhung der Foliedicke ein steiferes Biegeverhalten hervorrufen. (Günther 2023, S. 136–137)

(Schilling & Schmitt et al. 2016) entwickeln einen Prüfstand zur Untersuchung der Auswirkung von Biegekräften auf die Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat. Um Wickelprozesse in der Zellassembly abzubilden, wird die Elektrode über einen vorgegebenen Radius bewegt, während eine Kraft aufgebracht wird. Eine Auswertung

hinsichtlich der Biegeeigenschaften erfolgt jedoch nicht. (Schilling & Schmitt et al. 2016, S. 1505–1506)

(Weinmann 2022) untersucht die Biegsteifigkeit von nicht weiter spezifizierten, unterschiedlich stark kalandrierten Kathoden und Anoden mithilfe des Cantilever-Verfahrens für Kunststofffolien und textile Flächengebilde mit oder ohne Kunststoff-Deckschicht in Anlehnung an (*DIN 53362 2024*). Dabei wird die Probe über eine schiefe Ebene geführt, bis sie diese berührt. Anhand der Überhanglänge wird die Biegsteifigkeit berechnet. Für die Kathoden wird gegenüber der unkalandrierten Probe eine Zunahme der Biegsteifigkeit verzeichnet. Dies wird auf die bereits erläuterten, ursprünglich von (Gupta & Üçel et al. 2020, S. 852) beschriebenen, zusätzlichen Partikelkontakte zurückgeführt. Weiterhin wird die Ausbildung von Eigenspannungen als verstieffender Faktor in Erwähnung gezogen (Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 81). Die Biegsteifigkeit erreicht ab einem Verdichtungsgrad von 18 % ein Plateau. Im Gegensatz dazu zeigen die Anoden einen Abfall der Biegsteifigkeit, was durch die in (Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 175) beschriebenen, weicheren Graphitpartikel und somit geringere Reibung erklärt wird. Weiter wird anhand von (Sheng & Fell et al. 2014, S. 6) argumentiert, dass durch das Abgleiten der Graphitpartikel keine neuen Partikelkontakte ausgebildet werden können. Auch hier sinkt die Biegsteifigkeit ab einem Verdichtungsgrad von 10 % nicht weiter ab. (Weinmann 2022, S. 80–83)

Neben Elektroden werden vor allem auch ganze Batteriezellen gegen Biegung geprüft. Für diese Arbeit sind diese Untersuchungen weniger relevant, weshalb lediglich ein knapper Einblick gegeben wird. In (Budiman & Rahardian et al. 2022, S. 1) werden ganze Pouch-Zellen unterschiedlichen Aufbaus mithilfe des Dreipunktbiegeversuchs hinsichtlich ihres Widerstands gegen Schäden durch Biegung geprüft. Weitere Dreipunktbiegeversuche an ganzen Pouch-Zellen zeigen nach einer Durchbiegung von 15 mm keine Schäden (Keshavarzi & Gilaki et al. 2022, S. 6).

2.4.4.2 Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben, befindet sich in der Beschichtung ein gewisser Binderanteil, der für die Vernetzung der Partikel untereinander sorgt und die Partikel-Partikel-Kontakte stabilisiert. Dies wird als Kohäsion bezeichnet. Weiterhin hat der Binder die Aufgabe, die Kontakte zwischen den Partikeln und dem Substrat zu festigen. Dies wird als Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat definiert. (Gulbinska 2014, S. 71) Eine unzureichende Adhäsion kann zur Schichtablösung (Delamination) führen,

was negative Auswirkungen auf die Zyklenstabilität hat (Chen & Xie et al. 2006, S. 1102–1103; Jarvis & Macklin et al. 2001, S. 665). Weiter kann die Adhäsion der Beschichtung auf dem Substrat über die Betriebsdauer der LIB abnehmen (Jeong & Lee 2014, S. 526).

Im Folgenden werden die Methoden zur Prüfung der Adhäsion anhand der relevantesten Forschungsarbeiten vorgestellt.

In der Literatur finden sich viele Versuchsaufbauten, die dem 180°-Schälversuch für die Prüfung von Klebstoffen aus (*DIN EN ISO 8510-2 2010*) nachempfunden sind. Dazu werden die Elektroden in Streifen geschnitten und jeweils auf einen weiteren Streifen aus Klebeband oder aus Al-Folie aufgeklebt und angepresst. Die beiden freien Enden werden in eine Zugprüfmaschine eingespannt und mit konstanter Geschwindigkeit auseinandergezogen. Dabei wird die resultierende Kraft aufgezeichnet. (Gaikwad & Arias 2017, S. 6391; Vogel & Sederholm et al. 2022, S. 2, 4)

Eine Abwandlung des 180°-Schälversuchs ist der 90°-Schälversuch. Dieser ist für Proben besser geeignet, die im 180°-Schälversuch reißen. (*DIN EN 28510-1 2014*, S. 4) Im Gegensatz zum 180°-Schälversuch wird die Probe beispielsweise mit einem doppelseitigen Klebeband auf eine Trägerplatte aufgeklebt, während das lose Ende in die Zugprüfmaschine eingespannt wird. Während der Testfahrt muss ein 90 ° - Winkel durchgehend gewährleistet sein. (Baunach & Jaiser et al. 2016, S. 466)

Als weiteres häufig verwendetes, zugbasiertes Verfahren ist in der Literatur eine Methode zu finden, die dem Abreißversuch aus (*DIN EN ISO 4624 2023*) ähnelt. Dazu wird die Probe zwischen zwei Probenhaltern aufgeklebt. Der obere Probenhalter wird in einer Zugprüfmaschine eingespannt und nach oben verfahren, während der untere Probenhalter fixiert bleibt. (Haselrieder & Westphal et al. 2015, S. 2–3)

(Luo & Zhu et al. 2018) schlagen einen Schälversuch vor, der kombinierte Zug- und Scherlasten zulässt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Scherfestigkeit zwischen Beschichtung und Substrat von NMC-Kathoden doppelt so groß ist, wie die Zugfestigkeit. (Luo & Zhu et al. 2018, S. 3996–3997)

(Haselrieder & Westphal et al. 2015) und (Luo & Zhu et al. 2018) zeigen die Schadensbilder, die im Abschälversuch entstehen können. Sie sind außerdem in Abbildung 2-10 dargestellt. Es wird zwischen dem Versagen der Klebestelle zwischen Beschichtung und Kleber unterschieden, bei dem keine oder nur wenig Beschichtung abgelöst wird. Ein Kohäsionsversagen zeigt sich, wenn sowohl auf dem Substrat als auch auf dem

Kleber Beschichtung aufzufinden ist. Adhäsives Versagen weist kaum Partikel auf dem Substrat auf. (Haselrieder & Westphal et al. 2015, S. 3; Luo & Zhu et al. 2018, S. 3997)

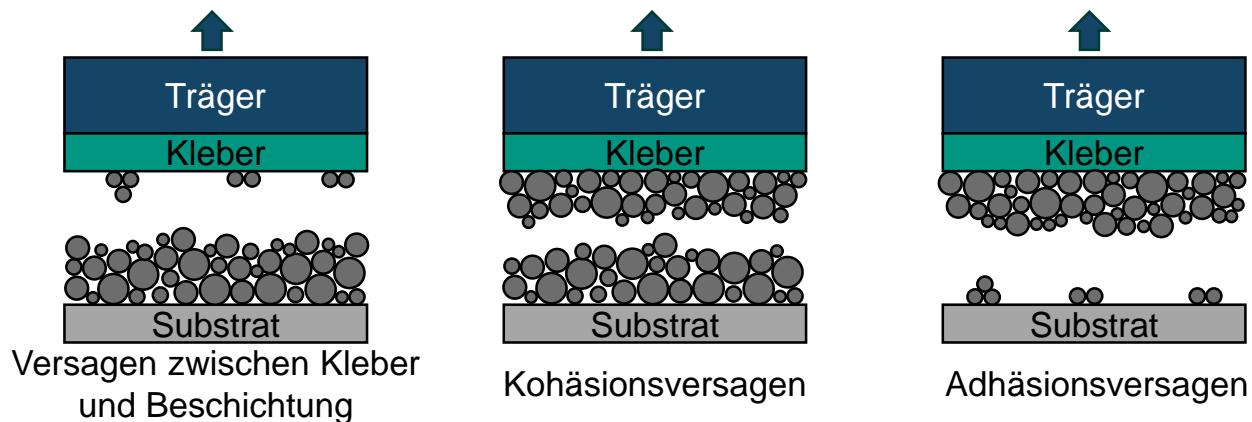


Abbildung 2-10 Versagensmechanismen in Anlehnung an (Haselrieder & Westphal et al. 2015, S. 3; Luo & Zhu et al. 2018, S. 3997)

Aus der Literatur können einige unterschiedliche Möglichkeiten extrahiert werden, wie die Schälversuche auszuwerten sind und wie sich die Adhäsion quantifizieren lässt. Dies hängt auch mit der Art des Versuchs zusammen. So wird zunächst die Berechnung der durchschnittlichen, minimalen, mittleren und maximalen Schälkräfte empfohlen (DIN EN ISO 8510-2 2010, S. 6). In (Bitsch & Dittmann et al. 2014, S. 88) wird die Angabe als Linienkraft vorgeschlagen, indem die mittlere Schälkraft durch die Probenbreite dividiert wird. Das gleiche Vorgehen wird auch in (Baunach & Jaiser et al. 2016, S. 466) gezeigt, wobei das Resultat als Haftkraft bezeichnet wird. (Haselrieder & Westphal et al. 2015, S. 3) schlagen die Angabe der Haftfestigkeit als Quotient der maximalen Schälkraft und der Probenfläche vor.

(Son & Ryou et al. 2014) berichten erstmals vom Einsatz des sogenannten Surface and Interfacial Cutting and Analysis System (SAICAS, dt. System zum Schneiden und Analysieren von Oberflächen und Grenzflächen) der Fa. Daipla Wintes Co., Ltd. aus Japan. Dabei wird die Beschichtung einer Elektrode mithilfe einer 1 mm breiten, schrägen V-förmigen Messerspitze in einer beliebigen Tiefe abgeschält, indem die Messerspitze horizontal bewegt wird. Da dieses Verfahren kaum mit dem in dieser Arbeit gewählten 90 °-Schälversuch vergleichbar ist, wird für Details auf (Son & Ryou et al. 2014, S. 526–527) verwiesen.

Zuletzt geht aus der Literatur die Anwendung des Ritztests in Anlehnung an (DIN EN ISO 20502 2016) als Verfahren zur Bestimmung der Adhäsion hervor. Mithilfe eines Stifts wird die Beschichtung eingeritzt, während die horizontale und tangentiale Kraft

aufgezeichnet werden. So kann auch die Kohäsion bestimmt werden. Die kleinste notwendige Normalkraft, die notwendig ist, um Delamination hervorzurufen, wird als Maß für die Adhäsion herangezogen. (Chen & Liu et al. 2013, S. A1504) Abweichend davon wird in (Schilling & Schmitt et al. 2016, S. 1507) die Rauheit als charakteristisches Merkmal für die Adhäsion angegeben.

Simulativ lässt sich die Adhäsion anhand der Kontaktfläche der Partikel mit dem Substrat sowie der Bindungskraft des Binders und der Anzahl der Bindungen bestimmen. (Sangrós Giménez & Schilde et al. 2020, S. 3)

Es zeigt sich also, dass die Vergleichbarkeit von Adhäsionsuntersuchungen aufgrund des Variantenreichtums als kritisch einzustufen ist. In dieser Arbeit wird der 90°-Schälversuch eingesetzt, da am Institut die nötige Anlagentechnik und das zugehörige Wissen verfügbar sind. So können die Ergebnisse mit Vorarbeiten verglichen werden. Der Versuchsaufbau und die Auswertemethodik werden in Kapitel 4.3 detailliert beschrieben.

Auch hinsichtlich des Einflusses des Kalandrierens auf die Adhäsion gibt es in der Literatur unterschiedliche Ergebnisse.

So zeigen (Dreger & Haselrieder et al. 2019) für moderat kalandrierte NMC111-Kathoden und Graphit-Anoden einen Abfall der Haftfestigkeit. Erklärt wird dieser Effekt durch Scherkräfte, die bei einer moderaten Verdichtung die Kontakte zwischen Partikeln und Substrat schwächen. Gleichzeitig gehen sie von einer zunehmenden Kohäsion aus. Weiter ist die Haftfestigkeit der Kathodenbeschichtung um den Faktor 2 größer als bei den Anoden. (Dreger & Haselrieder et al. 2019, S. 233)

Im Gegensatz dazu beobachten (Baunach & Jaiser et al. 2016) einen Anstieg der breitenbezogenen Haftkraft bei kalandrierten Graphit-Anoden im Vergleich zu unkalandrierten Proben. Sie vermuten eine Veränderung der Kontakte zwischen den Partikeln und dem Substrat, konkretisieren dies jedoch nicht weiter. (Baunach & Jaiser et al. 2016, S. 468)

(Meyer & Weyhe et al. 2020) führen Haftkraftmessungen an unterschiedlich stark kalandrierten NMC111-Kathoden durch, wobei die Walzentemperatur variiert wird. Die Proben versagen überwiegend an der Grenzfläche zwischen Beschichtung und Substrat. Mit zunehmender Verdichtung tritt zunächst eine Verringerung der Haftfestigkeit bis zu einem Minimum ein, welches in dieser Studie bei 30-35 % gefunden wird. Dies wird ähnlich wie in (Dreger & Haselrieder et al. 2019) durch die Scher- und Normalkräfte

erklärt, die während des Kalandrierens auf die Elektrode wirken. Weiter wird auf den um etwa Faktor 70 größeren E-Modul des Al-Substrats im Vergleich zum PVDF-Binder verwiesen. Scherkräfte können daher die Kontakte zwischen Binder und Substrat beschädigen bzw. zerstören. Anschließend steigt die Haftfestigkeit wieder an. Dies wird auf das Prinzip der mechanischen Verzahnung zurückgeführt, welches bereits von (Haselrieder 2017) beschrieben wurde. (Meyer & Weyhe et al. 2020, S. 7–8) Anhand von Lichtmikroskop-Aufnahmen des Substrats wird gezeigt, dass die NMC111-Partikel durch das Kalandrieren in das Al-Substrat eingedrückt werden. So entstehen zusätzliche Kontaktflächen, die für den Haftkraftanstieg verantwortlich sind. (Haselrieder 2017, S. 215–216) Auch die Untersuchungen von (Bold 2023, S. 67) an NMC811-Kathoden zeigen eine Zunahme der Haftkraft bei steigender Dichte und in das Substrat eingedrückte Partikel. Auch ohne das Eindringen der Partikel in das Substrat wird für eine Li-reiche NMC-Kathodenart mit einer Partikelgröße von ca. 2 µm in REM-Querschnitten eine Erhöhung der Kontaktflächen zwischen den Partikeln und dem Substrat nachgewiesen (Vogel & Sederholm et al. 2022, S. 3, 5).

(Schilcher & Meyer et al. 2016) führen Abreißversuche nach der Methodik von (Haselrieder & Westphal et al. 2015) an Lithiummanganoxid (LMO)-Kathoden durch. Sie finden hauptsächlich Brüche innerhalb der Beschichtung vor, was eine Messung der Kohäsion impliziert. Die Ursache des Kohäsionsbruchs wird auf die Normal- und Scherkräfte zurückgeführt, die das Partikel-Binder-Netzwerk schädigen. Die gemessene Kraft nimmt zunächst ab und steigt anschließend bei einer Erhöhung der Dichte wieder an, da die plastische Deformation der Partikel für eine Erhöhung der Kontaktflächen sorgt. (Schilcher & Meyer et al. 2016, S. 1606–1607, 1609)

2.4.5 Zukunftstrends, Anforderungen und Herausforderungen

Zunächst werden hohe Prozessgeschwindigkeiten bis zu $100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bei gleichbleibender Qualität angestrebt. Die Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit erfordert jedoch im Umformbereich eine Erhöhung der Linienlast. Der Trend hin zu höheren Flächenbeladungen vergrößert die Umformzone und somit auch die notwendige Linienlast zur Komprimierung bei gleichbleibendem Walzendurchmesser (vgl. Kapitel 2.4.2). Temperiertes Kalandrieren kann insbesondere bei Kathoden die benötigte Linienlast reduzieren und es wird weiterhin eine Reduktion von Verformungen der Elektroden erwartet, um so eine unveränderte Qualität zu erzielen. Weiter wird eine Vordehnung der Substrate vorgeschlagen, um eine weitere Dehnung während des Kalandrierens zu vermindern. Für

ein konstantes Kalandrierergebnis ist grundsätzlich ein konstanter Walzenabstand erforderlich. Hohe Linienlasten können zu einer Verformung des Walzengerüsts und somit zu einer Spaltaufweitung und einem Linienlasteinbruch führen (vgl. Kapitel 2.4.6). Es kommt hinzu, dass Beschichtungsbreiten auf der Anodenseite von bis zu 1,5 m und auf der Kathodenseite bis zu 2,0 m gefordert werden. Dabei werden Walzen mit großem Durchmesser eingesetzt, da diesen eine sanftere Verdichtung zugesprochen wird. Ziel ist es, die Durchbiegung der Walzen zu reduzieren und Verformungen in den Lagern und dem Walzengerüst zu minimieren, um Maschinengenauigkeiten von $\pm 1 \mu\text{m}$ einhalten zu können. Die daraus resultierenden Abweichungen der Schichtdicke der Elektrode sollten in-line geprüft werden. Aktuell mangelt es jedoch noch an geeigneter Messtechnik zur Schichtdicken- und Dichtemessung sowie an der Detektion von Defekten und der Bildung von Wirkzusammenhängen zwischen Fehlerbildern und Prozessgrößen. Auch die Forderung nach Nachverfolgbarkeit und Transparenz der Produktionsprozesse macht die Applikation und Detektion entsprechender Codes notwendig (Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 80–82).

Für Elektrofahrzeuge werden zudem möglichst hohe Energiedichten gefordert, um eine größere Reichweite zu erzielen. Für NMC-Kathoden entspricht dies einer Dichte $> 3,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, während für Graphit-Anoden eine Dichte $\geq 1,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ angestrebt wird. Diese hohen Dichten sind vor allem für die Kathoden entscheidend, während bei Graphit- und Graphit-Silizium-Anoden moderate Dichten bzgl. der Energiedichte ausreichend sind. Sie bringen bereits materialgebogene höhere spezifische Kapazitäten mit, während eine Verminderung der Ionendiffusion durch geringere Verdichtungsgrade vermieden werden kann. Ziel ist es, mechanisch günstige Schichteigenschaften zu erzielen, um weitere Beanspruchungen der Schicht beispielsweise durch die sog. Zellatmung beim Zyklieren zu minimieren. Insbesondere Silizium zeigt eine Volumenschwankung von 280 - 300 Vol.-% während der Zyklierung, während es bei Graphit lediglich 10 Vol.-% sind. Neben der Reichweite muss zudem auch die Schnellladefähigkeit gegeben sein. (Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 79)

2.4.6 Fehlerbilder und Detektion

Die Forderung nach hohen Energiedichten kann prozesseitig über die volumetrische Energiedichte erzielt werden. Dazu ist eine stärkere Verdichtung notwendig, die zu verschiedenen Fehlerbildern und somit zu Ausschuss führen kann. (Günther & Schreiner

et al. 2020, S. 1–2) Abbildung 2-11 zeigt einen Überblick über die makroskopischen Defekte, die durch das Kalandrieren hervorgerufen werden.

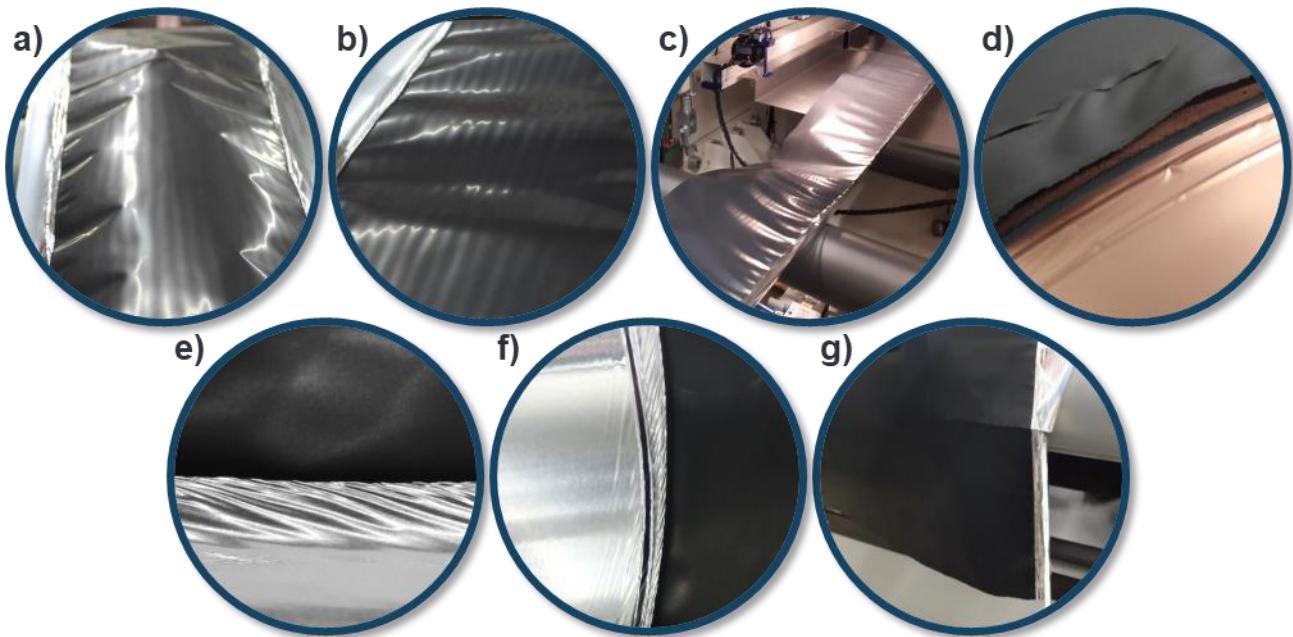


Abbildung 2-11 Übersicht über die durch das Kalandrieren hervorgerufenen Elektrodendefekte: a) Verformung, b) Welligkeit, c) Camber, d) Delamination, e) Folienverprägung, f) Längsfalte, e) Bahnriß

Zunächst verstieft sich die Elektrode im beschichteten Bereich insbesondere durch die Verdichtung und die inhomogene Spannungsverteilung. Durch die Erhöhung der Steifigkeit werden die Bahnführung über die Umlenkrollen und das Aufwickeln auf einen Wickelkern sowie das Abwickeln in den Folgeprozessen erschwert. Zusätzlich können Bahnrisse entstehen. (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 4–5)

Weiter ist eine Veränderung der Oberfläche bemerkbar. So ist die unkalandrierte Elektrodenoberfläche eher rau und matt, während die kalandrierte Elektrode glatt und spiegelnd beschaffen ist. Für den Einsatz von optischen Messsystemen kann dies herausfordernd sein, wie auch in Kapitel 4.2.1 beschrieben. (Mayr & Schreiner et al. 2022, S. 299)

Bei unzureichender Haftung zwischen Beschichtung und Substrat kann es durch das Kalandrieren zum Ablösen der Beschichtung kommen. Dies wird auch als Delamination bezeichnet. (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 4) Für Details zur Adhäsion wird auf Kapitel 2.4.4.2 verwiesen.

Der beschichtete Teil der Elektrode längt sich in Laufrichtung. Wird eine stark verdichtete Elektrode nach dem Kalandrieren längs in der Mitte zerschnitten, so zeigt sich die

typische sogenannte „Bananenform“, auch Säbel- oder Camber-Effekt genannt. Die Elektrode biegt sich in Richtung der kürzeren Seite also zu der Seite mit dem unbeschichteten Substratrand. Wird eine asymmetrische Elektrode, also beispielsweise eine Elektrode, die lediglich auf einer Seite einen unbeschichteten Bereich hat, stark kalandriert, so zeigt sich dieser Effekt ebenfalls. (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 2)

Weiter entstehen Wellen, die in Abhängigkeit des Materials und der Prozessbedingungen unterschiedliche Wellenlängen und Amplituden aufweisen und sich über die gesamte Bahnbreite erstrecken oder auch nur im beschichteten Randbereich auftreten. Als Ursache wird eine zu hohe Linienlast vermutet. (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 2–3) Die Aufzeichnung der Deformation kann mithilfe eines optischen 3D-Scanners oder durch Lasertriangulation erfolgen (Mayer & Wurba et al. 2021, S. 3; Mayr & Schreiner et al. 2022, S. 297). (Mayr & Schreiner et al. 2022) schlagen eine Quantifizierung anhand des Defect Evaluation Index (DEI, dt. Fehlerbewertungsindex) vor, der die maximale Differenz zwischen dem niedrigsten Wellental und dem höchsten Wellenberg beschreibt. An Li- und Mn-reichen NMC-Kathoden wird gezeigt, dass die Elektrode insgesamt eine gekrümmte, ausgebeulte Form aufweist, bei der sich der unbeschichtete Rand nach oben wölbt. Nahe der Beschichtungskanten werden kleine Wellen beobachtet, die durch die großen Wellen über die gesamte Elektrode überlagert werden. (Mayr & Schreiner et al. 2022, S. 297–298) In (Günther 2023, S. 125) wird dieser Effekt ebenso beobachtet und auf die Längung der Beschichtung bei gleichbleibendem unbeschichteten Substratrand zurückgeführt. Eine Temperierung der Walzen führt zu einer Reduktion des DEI (Mayr & Schreiner et al. 2022, S. 298). Weiter wird die Welligkeit in die Wellenlänge und die Wellenhöhe unterteilt. Untersuchungen an NMC111-Kathoden ergeben einen positiven Zusammenhang zur Massenbeladung, während kein Einfluss der Dicke des Substrats feststellbar ist. Mit zunehmender Verdichtungsrate sinkt die Wellenlänge für hohe Massenbeladungen zunächst und steigt dann wieder an. Bei niedriger Massenbeladung ist die Wellenlänge mit steigender Verdichtungsrate zunächst eher konstant und steigt mit weiterer Verdichtung ebenso an. Jedoch wird für diese Effekte lediglich eine niedrige Signifikanz gefunden. Die Wellenhöhe steigt linear mit der Verdichtung, was auf eine stärkere Verschiebung der Partikel und Dehnung des Substrats zurückgeführt wird. Entgegen der Erwartung wird mit steigender Walzentemperatur ein leichter Abfall der Wellenhöhe und -länge beobachtet, wobei dieser Effekt nicht signifikant ist. Dies wird der Duktilität des Binders zugeschrieben, wodurch

weniger Kraft für eine Verschiebung der Partikel benötigt und somit geringere Dehnungen hervorgerufen würden. (Günther 2023, S. 118–123)

Die Bildung von Wellen ist auch beim Kaltwalzen von Blechen eine bekannte Herausforderung. Fällt die Bahnspannung unter einen kritischen Wert, so kann Wellenbildung eintreten. Analytisch wird gezeigt, dass die Wellen hauptsächlich am Rand auftreten und deren Wellenlänge mit steigender Bahnspannung abnimmt. (Rammerstorfer & Fischer et al. 2001, S. 403) (Fischer & Rammerstorfer et al. 2003, S. 89) fügen dem hinzu, dass sich die Wellen in Richtung Bahnmitte verschieben. Wellen können außerdem durch die Walzenbiegung in Folge sehr hoher Spaltlasten hervorgerufen werden. Abbildung 2-12a) zeigt schematisch die Abweichungen von einem parallelen Walzenspalt. Wenige Hundertstel Millimeter sind bereits ausreichend, um Welligkeiten im Bereich der Engstellen hervorzurufen. (Rammerstorfer 2018, S. 890–891; Röthemeyer 2013, S. 620–621)

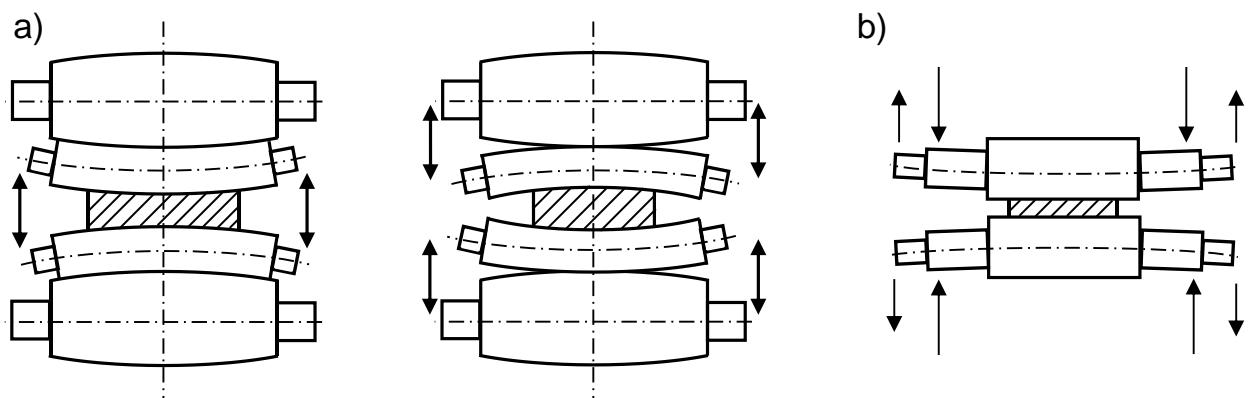


Abbildung 2-12 a) Abweichungen von einem parallelen Walzspalt nach (Rammerstorfer 2018, S. 891), b) Gegenbiegung nach (Röthemeyer 2013, S. 623)

Dem kann durch einen besonderen Schliff, der auch als Bombage bezeichnet wird, entgegengewirkt werden. In den meisten Fällen wird der Schliff konvex gefertigt. Nachteilig ist, dass die geschliffenen Walzen nur für den dazugehörigen Anwendungsfall geeignet sind. Weitere Abhilfe kann die Gegenbiegung mithilfe von Zusatzkräften schaffen, wie in Abbildung 2-12b) dargestellt ist. (Röthemeyer 2013, S. 621, 623) Es gibt bereits einige Simulationsansätze zur Erlangung eines besseren Verständnisses der Wellenbildung. Beispiele finden sich unter anderem in (Abdelkhalek & Zahrouni et al. 2009), (Abdelkhalek & Zahrouni et al. 2015) und in den Kapiteln 2.4.2 und 2.5.2. Da die Wellenbildung nicht Hauptfokus dieser Arbeit ist, soll im Folgenden nicht tiefer auf simulative Studien eingegangen werden.

Ein weiteres Fehlerbild sind kleine Falten im unbeschichteten Substrat. Diese prägen sich in einem gewissen Winkel zur Laufrichtung aus. Sie bilden sich auch aufgrund der Längung des beschichteten Bereichs der Elektrode und des unveränderten unbeschichteten Substratrands (Bold & Fleischer 2018, S. 573). Als Ausgleichsbewegung entsteht die sogenannte Folienverprägung oder Folienverzug (Günther 2023, S. 61), die in (Bold 2023) als Wrinkles bezeichnet werden. Die deutsche Übersetzung von „wrinkle“ lautet lediglich „Falte“, während die Längsfalten im Englischen folglich als „longitudinal wrinkle“ eingeführt werden. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird dieses Fehlerbild im Folgenden auf Deutsch als Folienverprägung bezeichnet und im Englischen wie von (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 2) vorgeschlagen als „foil embossing“. Folienverprägung kann dazu führen, dass die unbeschichteten Substratränder nicht mehr vollständig plan aufeinander liegen und es zu Problemen beim Verschweißen der Ableitertabs kommt (Bold & Fleischer 2018, S. 574). In (Bold 2023, S. 72–73) wird die Aufzeichnung der Folienverprägung und Auswertung der Höhe, Länge und Breite der einzelnen Falten mithilfe eines Linienlasers und durch ein Kamerasytem durchgeführt.

Trifft eine stark deformierte Elektrode in Kombination mit einem hohen Bahnzug auf eine Umlenkrolle, so kommt es häufig zur Bildung von Längsfalten. Diese können im weiteren Produktionsprozess bis zur Vereinzelung zu BahnrisSEN führen. Die Längsfalten verbleiben in der Substratfolie und können beispielsweise beim Ausschneiden der Ableitertabs mittels Laserschneidverfahren herausfordernd werden, da sich die Längsfalte aus der Substratebene heraushebt. Weiter können Längsfalten in Ableitertabs ebenso wie die Folienverprägung zu Problemen beim Verschweißen der Ableitertabs führen, da die Fläche nicht eben ist (Bold & Fleischer 2018, S. 574). Längsfalten stellen daher ein hohes Produktionsrisiko dar (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 315). Da sich die vorliegende Arbeit tiefgreifend mit der Problematik der Längsfaltenbildung auseinandersetzt, wird auf die folgenden Kapitel verwiesen.

Sehr dünne Folien erhöhen das BahnriSSrisiko. Weiterhin kann Rissbildung in der Beschichtung als Folge von Kaltverformung auftreten. Dieser Defekt tritt vermehrt in Elektroden auf, welche mit der Binderkombination CMC/SBR hergestellt wurden, da dieser weniger elastisch als PVDF ist. Eine Temperierung kann den Verdichtungswiderstand der Elektroden senken und die Rissbildung minimieren. Eine weitere Folge zu hoher Linienlasten können verschlossene Poren an der Oberfläche der Elektrode sein. DickeSchwankungen nach dem Kalandrieren können ihre Ursache in inhomogenen

Beschichtungsdicken aus dem Beschichtungsprozess haben. (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 3–5) Weiter kommen schief eingestellte Walzen als Ursache infrage.

Bei starker Verdichtung können Partikel brechen, wie am Beispiel von NMC622 Kathoden gezeigt wird. Dies führt beispielsweise zu einer vermehrten Feuchtigkeitsaufnahme und beeinflusst die elektrochemischen Eigenschaften. (Huttner & Diener et al. 2021, S. 5–6, 9)

Zuletzt ist der sogenannte Springback-Effekt (dt. Rückfederung) nicht zu vernachlässigen. Die verdichtete Elektrode entspannt sich nach dem Kalandrieren mechanisch, wodurch die Dicke der Beschichtung wieder zunimmt. Die Stärke des Springbacks wird als Verhältnis zwischen Spaltabstand und Dicke der kalandrierten Elektrode angegeben. (Diener & Ivanov et al. 2022, S. 4) Die Rückfederung entspricht dem elastischen Teil der Deformation der Beschichtung und wird daher insbesondere der Elastizität der Aktivmaterialpartikel zugeordnet (Diener & Ivanov et al. 2022, S. 8).

Insgesamt ergibt sich also ein Zielkonflikt aus den Anforderungen an die elektrochemischen Eigenschaften und dem Prozessfenster, in dem eine defektfreie Verarbeitung möglich ist.

2.5 Längsfalten und Deformationen in Bahnen anderer industrieller Anwendungen

Die Bildung von Deformationen wie Falten, Beulen und Wellen in Längs- und Querrichtung ist in vielen bahnverarbeitenden Industriezweigen wie der Papier-, Folien- und Textilindustrie schon seit langer Zeit eine bekannte Herausforderung (Good & Kedl et al. 1997, S. 462; Roisum 1996, S. 217). Insbesondere die Bildung von Falten in Laufrichtung in Metallbahnen führt zu Ausschuss, BahnrisSEN und Produktionsunterbrechungen von mindestens einem Tag (Jacques & Elias et al. 2007, S. 33).

2.5.1 Definitionen und Ursachen von Längsfalten

In (Jacques & Elias et al. 2007) werden Falten als plastische Deformation in dünnen Metallbahnen definiert, die sich in Laufrichtung ausbilden, wenn die Bahn in Bewegung ist und über eine Umlenkrolle geführt wird. Die Bahn muss unter einer gewissen Grundspannung σ_W stehen, um das Wandern der Bahn zu verhindern. Diese Bahnspannung σ_B , für die $\sigma_B \geq \sigma_W$ gilt, wird, wie in Abbildung 2-13 gezeigt, durch den Bahnzug F_B erzeugt. Dabei ist die Grundspannung σ_W in der Regel größer als die kritische

Spannung $\sigma_{k,B}$, ab der Beulen (engl. „buckling“) auftritt, weshalb sich dieses Phänomen im ungestützten Bereich zwischen zwei Umlenkrollen finden lässt. Die Auslenkung bleibt dabei gemäßigt, da die Grundspannung σ_W auch stabilisierend wirkt und die Spannungen im elastischen Bereich verbleiben. Falten entstehen ausschließlich unter der Voraussetzung, dass die kritische Spannung zur Bildung einer Falte $\sigma_{k,F}$ überschritten wird. Die Bahnspannung σ_B sollte daher in einem Bereich gewählt werden, der groß genug ist, dass die Bahn nicht wandert, und klein genug, um die Faltenbildung zu unterbinden. (Jacques & Elias et al. 2007, S. 33–36)

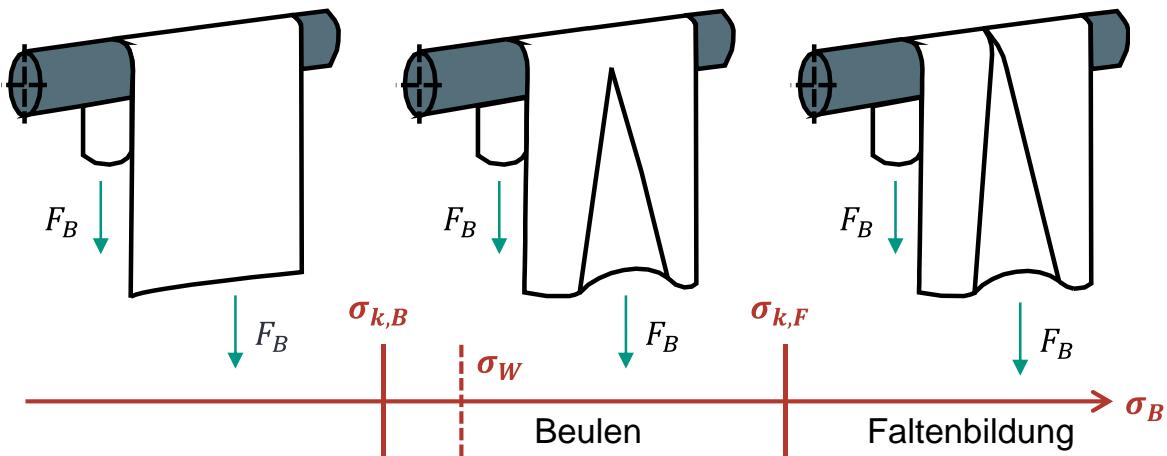


Abbildung 2-13 Beulen und Faltenbildung in Abhängigkeit der Spannung, erweitert nach (Jacques & Elias et al. 2007, S. 34)

Erweiternd führt (Roisum 1996) die Faltenbildung im Allgemeinen auf Druckspannungen zurück, die diese Beulphänomene hervorrufen. Die Bahn wird mit einem Seil verglichen, welches nicht ohne ein „Ausbeulen“ verschoben werden kann. Die Faltenbildung wird anhand des Mohrschen Spannungskreises erläutert. (Roisum 1996, S. 217) Dieser zeigt in jedem Punkt die Normalspannungen σ sowie die Schubspannungen τ im einachsigen Spannungszustand in einer gewählten Schnittebene (Läpple 2011, S. 67). Abbildung 2-14a) zeigt den Mohrschen Spannungskreis für eine Bahn im nicht-deformierten Zustand. Der positive x-Achsenabschnitt repräsentiert im Mohrschen Spannungskreis die Laufrichtung der Bahn, die mit der positiven Zugspannung $\sigma_{Zug} = \sigma_B$ beaufschlagt ist und die der Bahnspannung σ_B entspricht. Der negative x-Achsenabschnitt gibt die Druckspannungen σ_{Druck} an und entspricht der Querrichtung, also der x-Richtung im Maschinenkoordinatensystem. In Querrichtung gibt es im nicht-deformierten Zustand keine Spannungen σ_q , weshalb der Kreis den Ursprung schneidet. Im Druckspannungsbereich befindet sich auch die Spannungsgrenze zur Bildung

von Beulen und Falten, die bei sehr dünnen Materialien der Dicke $d < 0,25 \text{ mm}$ unabhängig von ihrer Materialzusammensetzung bereits bei sehr kleinen Druckspannungen überschritten wird. Bei Materialien mit $d > 2,5 \text{ mm}$ treten daher selten Falten auf. Sobald eine geringe Spannung in Querrichtung auftritt, wird der Mohr'sche Spannungskreis nach links über den Ursprung und die Beul- und Faltengrenze hinaus verschoben. Dieser Zustand, in dem sich die Falten parallel zur Laufrichtung ausprägen, ist in Abbildung 2-14b) zu sehen. Spannungsabfall, Feuchtigkeitsanstieg oder Temperaturerhöhung können Ausdehnungen einer Bahn hervorrufen. Hat die Bahn nicht die Möglichkeit zu expandieren, so werden Druckspannungen erzeugt und es kommt zum Beulen aus der Ebene heraus. Druckspannungen entstehen auch, wenn sich die Bahn zusammenzieht. Schwere Umlenkrollen können sich unter ihrer eigenen Last nach unten durchbiegen, was zum Einschnüren der Bahn führen kann. Das Versagen von Breitstreckwalzen, welche in Kapitel 2.6.1 im Detail eingeführt werden, hat den gleichen Effekt. Eine deutliche Ausbeulung entsteht bereits ab Dehnungen von 0,1 %. Bei einem Überschreiten von 1 % ist das Risiko für Falten sehr hoch und die Bahn wellt sich. Wird dem System Scherspannung hinzugefügt, so wird der Mohr'sche Spannungskreis ebenfalls in die Beul- und Faltenzone verschoben. Ursache können schief eingespannte Bahnen oder nicht parallel ausgerichtete Rollen sein. In diesem Fall formieren sich die Falten jedoch schräg zur Laufrichtung und werden als Scherfalten bezeichnet. (Roisum 1996, S. 217–220) In (Walker & Cole 2011, S. 11) sind Scherfalten in Cu-Folien zu sehen, welche schräg und lang sind und daher schrägen Längsfalten ähneln.

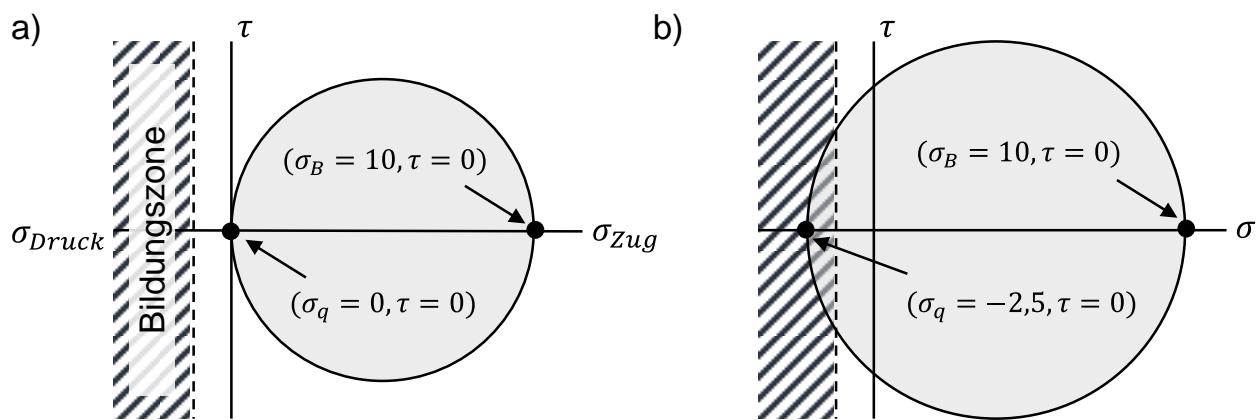


Abbildung 2-14 Mohr'scher Spannungskreis für die Beul-, Knick- und Faltenbildung in Bahnen nach (Roisum 1996, S. 218–219): a) Normalzustand, b) Bildung von Beulen, Knicken und Falten

(Good & Kedl et al. 1997, S. 462) nennen ebenfalls die ungenaue Ausrichtung der Umlenkrollen und weiter die Bahngeschwindigkeit und die Kontaktflächen zwischen Rollen

und Material als Ursachen für die Längsfaltenbildung unter der Annahme, dass das Material gleichförmig ist. Weiter kann die Biegung von Stahlbahnen infolge ungleich langer Seiten (engl. camber) eine Ursache für die Ausbildung von Beulen sein. Beim Überschreiten einer kritischen Reibung verwandeln sich diese in Falten. (Dixon & Yuen 2008, S. 95–96)

In (Brown 2008) wird die Ausbildung einer Längsfalte in einem eigens dafür konzipierten Prüfstand anhand einer Latex-Bahn anschaulich dokumentiert. In der Bahn befinden sich bereits Beulen, die sich in der Mitte konzentrieren. Durch das Ausbeulen weist die Bahn eine konische Form auf. Da sich eine Bahn stets rechtwinklig zu der Umlenkrolle ausrichtet, auf die sie auftrifft, wird die Bahn in die Mitte gezogen. So befindet sich überschüssiges Material in der Mitte, was zu einer Zunahme der Druckspannungen in Querrichtung führt. Die Ausbeulung wird über die Umlenkrolle hinausgehoben, weshalb sich die Bahn an dieser Stelle mit höherer Geschwindigkeit bewegen muss. Sobald die Ausbeulung die Kontaktlinie zwischen Bahn und Umlenkrolle passiert hat, prägt sich die Falte aus. Diese wird schmäler und gewinnt an Höhe, da immer mehr Material in die Mitte gefördert wird. Die Falte wächst und überschlägt sich mit zunehmender Materialmenge, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. (Brown 2008, S. 6–9)

(Coupeau & Durinck et al. 2024) zeigen verschiedene Knickstrukturen in verschiedenen Beschichtungen auf Substraten mit einer Dicke im Nanometer-Bereich. Darunter ist auch die in (Jacques & Elias et al. 2007) gezeigte Längsfalte zu erkennen. Die Falte wird durch ihre Breite sowie durch die maximalen Auslenkungen nach oben und unten beschrieben. (Coupeau & Durinck et al. 2024, S. 1–2)

2.5.2 Simulative Untersuchungen der Falten- und Deformationsbildung

Es gibt bereits zahlreiche numerische und analytische Ansätze, um die Falten- und Wellenbildung in homogenen Bahnen zu charakterisieren und vorherzusagen. Dieses Kapitel soll daher einen Überblick über die darin gewonnenen Erkenntnisse geben.

(Jacques & Potier-Ferry 2005) bestätigen mithilfe eines analytischen Ansatzes, dass Druckspannungen in Querrichtung für das Ausbeulen verantwortlich sind. Diese Druckspannungen werden durch die Zugbelastung hervorgerufen. (Jacques & Potier-Ferry 2005, S. 809)

Ergänzend wird in (Jacques & Elias et al. 2007) mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) eine numerische Studie an einer Bahn durchgeführt, die unter Zugspannung

steht und über eine konische Umlenkrolle gezogen wird. Die Geometrie der Umlenkrolle führt zu Druckspannungen kurz vor der Rolle und somit zu einem inhomogenen Spannungsfeld. Beim Kontakt der Bahn mit der Umlenkrolle wird die Zunahme der Druckspannung unterbrochen. (Jacques & Elias et al. 2007, S. 33–36) Weiter wird die Breite der Bahn durch das Beulen zwischen den Umlenkrollen reduziert. Um die ursprüngliche Breite beim Kontakt der Bahn mit der Umlenkrolle wiederherzustellen, muss die Bahn in der Querrichtung verrutschen. Diese minimalen Bewegungen verursachen Reibung, die wiederum zusätzliche Druckspannungen induzieren, die größer als die Druckspannungen aufgrund der Streckung der Bahn sind. Zur Erklärung der Faltenbildung wird der folgende Mechanismus vorgeschlagen. Das Beulen verursacht einen Gradienten der plastischen Dehnung über der Dicke der Bahn. Sobald die Bahn auf die Umlenkrolle trifft, werden aufgrund der Dehnungsunterschiede Eigenspannungen induziert, die wiederum das Beulen verstärken. Die Auslenkung nimmt zu und erhöht die plastischen Dehnungen und die Eigenspannungen zusätzlich. Die Deformation bzw. Krümmung der Bahn nimmt also zu und eine Falte entsteht, die sich mit der weiteren Bewegung der Bahn auch weiter in die Bahn zieht. (Jacques & Elias et al. 2007, S. 38–39)

In (Friedl & Rammerstorfer et al. 2000, S. 189) wird eine Möglichkeit gezeigt, die kritische Spannung in Abhängigkeit eines Knickkoefizienten zu bestimmen, der wiederum numerisch bestimmt wird und von Geometriefaktoren abhängig ist.

In einer Studie von (Huang & Yang et al. 2020) werden verschiedene Ausprägungen der Zugbelastungen an Metallfolien simulativ untersucht. Es zeigt sich, dass die Faltenbildung sehr stark vom spezifischen Lastfall abhängt. Beispielsweise ist die Wahrscheinlichkeit der Faltenbildung geringer, wenn die Zugspannungen an den Rändern der eingespannten Kante größer als in der Mitte sind, was nach der Einschätzung der Autoren bei der Anwendung in der Metallfolienherstellung zur Minimierung der Faltenbildung beitragen kann. (Huang & Yang et al. 2020, S. 2–3, 6)

(Jones 2021) beschreibt die Bildung von mehreren parallelen Wellen, die Längsfalten optisch ähneln. Sie treten in der gespannten Bahn auf, wenn zwei Umlenkrollen in einer planen Ebene liegen. Dabei sind die Rollen um einen kleinen Winkel gedreht, sodass die Bahnkanten eine kürzere und eine längere Seite haben. Die Ausbreitungsrichtung ist dann quer zur Laufrichtung der Bahn. (Jones 2021, S. 2) Der Autor schlägt vor, dass entstandene Schubspannungen aus der Bahn entfernt werden können, indem die Bahn durch eine zusätzliche Vorrichtung quer gestreckt wird, Umlenkrollen mit weniger

Reibung verbaut werden oder eine Erhöhung der Bahnspannung erfolgt. So könnte die Bahn wieder in die plane Ausgangsausrichtung versetzt werden. (Jones 2021, S. 5–6) Eine ausreichende Spannung empfehlen auch (Chen & Ou et al. 2011, S. 96).

Es wird jedoch nicht nur die Faltenbildung in Metallbahnen untersucht, sondern auch in unter Zugbelastung stehenden, dünnen elastischen Folien. So bestätigen beispielsweise (Yurcu & Beisel et al. 2012, S. 37) für Polyesterbahnen bei der Führung über einseitig verjüngte Walzen die Erkenntnisse aus (Jacques & Elias et al. 2007). Auch (Beisel & Good 2005) beschäftigen sich mit konischen Umlenkrollen. (Healey & Li et al. 2013; Huang & Hu et al. 2015; Sipos & Fehér 2016; Taylor & Bertoldi et al. 2014; Zheng 2009) forschen an der Bildung von Falten bzw. wellenförmigen Fehlerbildern in zugbelasteten Kunststoffmembranen. (Yan & Zhang et al. 2014) untersucht den Einfluss von zusätzlich eingebrachten Löchern, während (Wang & Yang et al. 2020) gekrümmte eingespannte Bahnen verwenden. An dieser Stelle wird auf eine weitere Ausführung verzichtet und auf die genannte Literatur verwiesen. Elektroden enthalten einerseits keine Kunststoffsubstrate und andererseits liegt der Fokus dieser Arbeit nicht auf simulativen Untersuchungen.

2.6 Industrielle Maßnahmen gegen Faltenbildung in der Bahnverarbeitung

Wie bereits in Kapitel 2.4.1 dargelegt, wird das Kalandrieren auch in anderen Industriezweigen eingesetzt und auch die Bildung der Falten ist, wie in Kapitel 2.5 gezeigt, ein bekanntes Problem. Bei der Auslegung einer Anlage kann davon ausgegangen werden, dass vor jeder Umlenkrolle, wie sie beim Kalandrieren, Laminieren und Beschichten auftreten, sowie vor dem Wickeln und beim Schneiden entsprechende Maßnahmen zur Glättung der Bahn getroffen werden müssen (Roisum 2016, S. 263). Aus diesem Grund existieren bereits Lösungen und Konzepte zur Faltenvermeidung, von denen die Relevantesten im Folgenden erläutert werden.

2.6.1 Breitstreckwalzen

Ein weit verbreitetes Konzept sind sogenannte Breitstreckwalzen, die es in einer großen Variantenvielfalt gibt. Sie dienen dazu, Kräfte in die Bahn einzubringen, die quer zur Laufrichtung wirken und so eine Streckung der Bahn erzeugen (Schmoock 1990, S. 2).

Bereits 1975 stellt (Knight 1975) in seinem Patent eine Anordnung von mehreren gebogenen Rollen zum seitlichen Strecken von Bahnen vor. (Vesterlund 2005) zeigt eine Breitstreckwalze mit drehbaren Walzsegmenten für die Papierherstellung. Weitere Breitstreckwalzen mit gebogener Achse finden sich auch in (Honold & Erkelenz 2015), (Rantapää & Huiranainen et al. 2013), (McIntosh & Thisse 1988) und (Jokinen 1998). Das Konzept ist dabei stets ähnlich und ist in Abbildung 2-15 beispielhaft dargestellt.

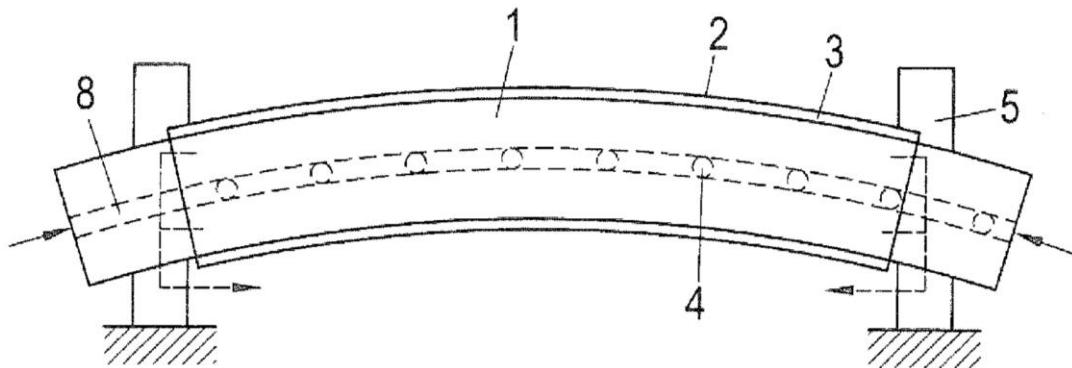


Abbildung 2-15 Beispiel einer Breitstreckwalze mit gebogener Achse, entnommen aus (Honold & Erkelenz 2015, S. 1)

Die Walze mit feststehender gebogener Achse ist beidseitig gelagert. Der Walzenmantel ist aus einem flexiblen Material, beispielsweise Polyurethan oder Gummi, gefertigt und auf der Achse rotierbar gelagert. (Honold & Erkelenz 2015, S. 1, 2020, S. 2) Aufgrund ihrer Form wird diese Art auch als Bananenwalze bezeichnet (Koren 1995, S. 2).

Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 2-16 dargestellt. Eine Bahn richtet sich stets rechtwinklig zu der Achse der Umlenkrolle aus, auf die sie trifft (Brown 2008, S. 3).

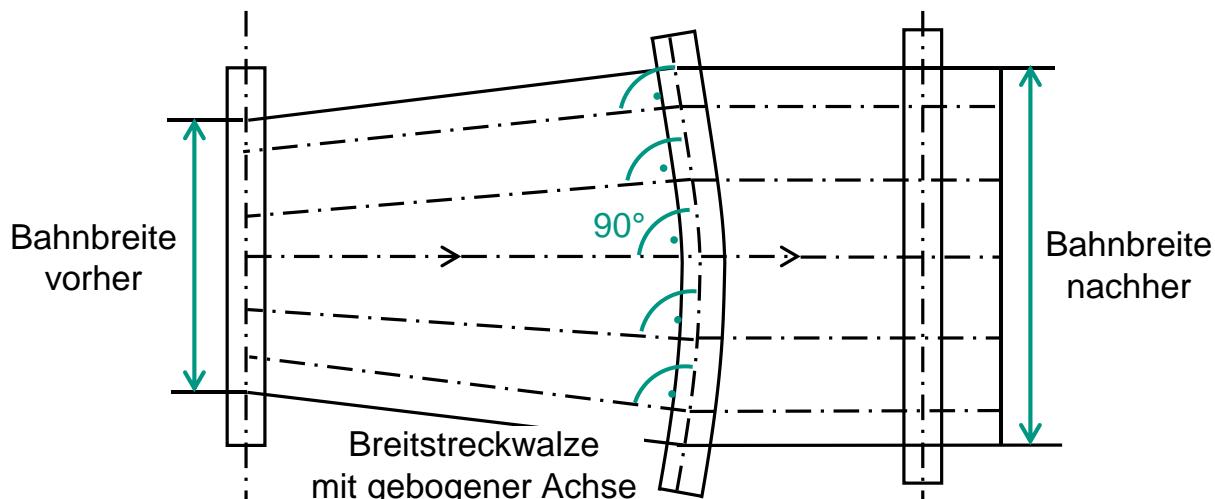


Abbildung 2-16 Funktionsweise einer Breitstreckwalze mit gebogener Achse nach (Damour 2002, S. 73)

Das bedeutet, die eingeschnürte Bahn wird auf der gebogenen Walze versuchen, einen 90° -Winkel zur Achse zu erreichen, was die Streckwirkung nach außen induziert. (Dammour 2002, S. 73) Auch (Swanson 1997, S. 420–421) weisen experimentell nach, dass die gebogenen Breitstreckwalzen eine Spreizwirkung zeigen.

Aufwändiger gestaltet sich die Breitstreckwalze von (Dienst & Bischof et al. 2013) für die Papierherstellung. Auf einer Welle sitzen sogenannte Koppelemente, die aus einem elastischen Material gefertigt sind und eine Hohlwelle tragen. Anhand der Größe, Anzahl und Anordnung der Koppelemente lässt sich die Biegelinie des Hohlzylinders einstellen. (Dienst & Bischof et al. 2013, S. 3–5)

(Schmoock 1990) zeigen im Gegensatz dazu eine Walze mit gerader Achse, deren Mantel ein spiralförmiges Profil aufweist, welches durch das schräge Aufwickeln eines Gummistreifens erzeugt wird. Dabei wird die Wicklung spiegelsymmetrisch aufgebracht. Abbildung 2-17 zeigt dieses Konzept. Die Erfinder weisen darauf hin, dass dieses Konzept günstiger und flexibler ist, als das Profil spanend in Stahlwalzen einzubringen. Als Anwendungsfelder für diese Breitstreckwalzen werden Kunststofffolien, Papier, Gewebe und Vliese genannt. (Schmoock 1990, S. 1–2)

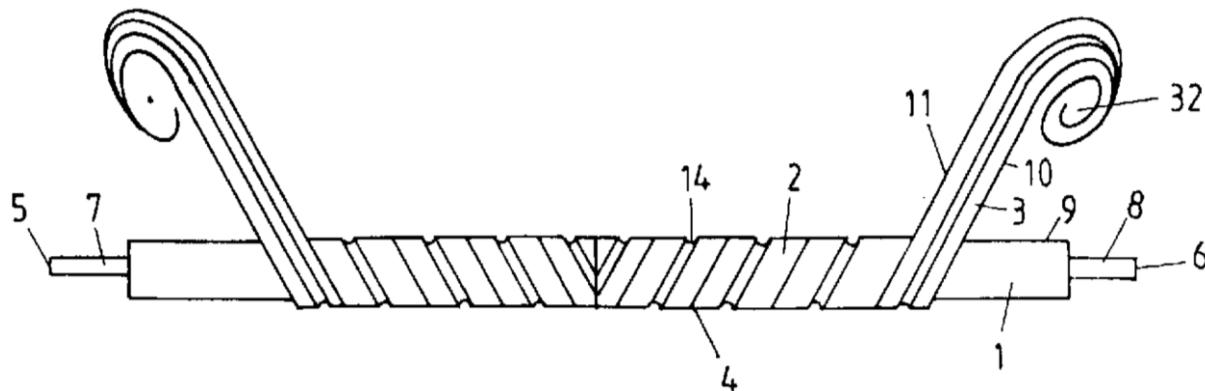


Abbildung 2-17 Breitstreckwalze mit gerader Achse und spiralförmigem, gewickeltem Profil, entnommen aus (Schmoock, 1990, S. 7)

(Sainio & Peglow et al. 2001) zeigen verschiedene Spiralformen auf geraden Walzen für das Bedrucken von Papier. Die Breitstreckwalze wird lediglich im Anfahrprozess angedrückt und später zurückgezogen, damit die Farbe nicht verschmiert. (Sainio & Peglow et al. 2001, S. 1, 7) Auch in (Wang 2020) wird eine gerade Walze mit spiralförmiger Oberfläche dargestellt. (Podlesny & Schneiders 2010, S. 1) bringen eine elastische Schicht auf eine starre Rolle auf, die so abgetragen wird, dass von der Mitte ausgehend zwei entgegengesetzt laufende angeraute Spiralen zurückbleiben. Eine weitere Breitstreckwalze mit spiralförmig proflierter Oberfläche, die aus vielen einzelnen

rechteckigen Elementen aufgebaut ist, wird in (Zhang 2019) präsentiert. Ein ähnliches Konzept zeigt (Koren 1995). Eine gerade Welle trägt einen Lamellenring, der ebenfalls symmetrisch ist und eine fast glatte Oberfläche hat. Der äußere Umfang ist dabei axial verschiebbar und nach außen hin weicher als in der Mitte. Weiter kann ein Mantel aufgezogen werden. Es wird angeführt, dass ungleichmäßige Oberflächen bei der Verarbeitung von sehr dünnen und empfindlichen Materialien wie Seide oder insbesondere Al-Folien zu Abdrücken oder Falten führen können. (Koren 1995, S. 1–4) Statt eines Lamellenrings können, wie in (Hessenbruch 2017) gezeigt, auch spezielle Spreizelemente verwendet werden. Zur Förderung von Blechen können Rollenpaare eingesetzt werden, die ebenfalls eine spiralförmige Oberfläche aufweisen (Luo & Tan et al. 2017). (Swanson 1997) stellen jedoch in experimentellen Untersuchungen fest, dass die Wirkung eines nach außen gewundenen Bandes keine Spreizwirkung hervorbringt. Auch nach innen gewundene Spiralen durch Bänder ergeben bessere, aber dennoch nicht zufriedenstellende Ergebnisse. Flexible Spiralrollen hingegen erfüllen die Anforderungen und zeigen eine Spreizwirkung. Starre Spiralrollen können die Bahn allerdings nicht spreizen. (Swanson 1997, S. 420–421)

Eine Breitstreckwalze mit gerader Achse, aber expandierender Oberfläche wird in (Damour 2002, S. 74) gezeigt. Das Konzept ist in Abbildung 2-18 dargestellt. Die Achse steht fest, während sich der Gummimantel mitdreht. Die Bahn trifft also an der kurzen Seite auf die Gummimantelfläche und verlässt die Walze auf der expandierten Seite wieder, wodurch sich eine Streckung der Bahn ergibt. (Damour 2002, S. 74).

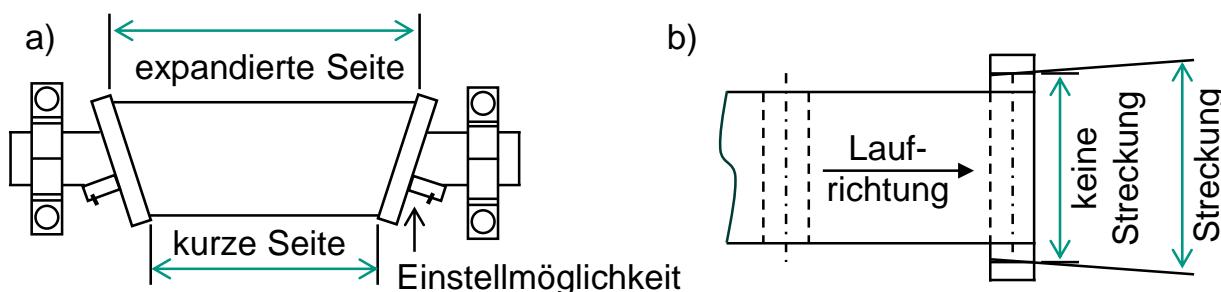


Abbildung 2-18 a) Breitstreckwalze mit gerader Achse und expandierender Oberfläche, b) Draufsicht mit eingespannter Bahn nach (Damour 2002, S. 74)

Weiter gibt es konvexe Walzen, deren Durchmesser nach außen hin abnehmen. Diese werden beispielsweise bei der Produktion von Harzfilmen kurz vor dem Aufwickler verbaut, um die Faltenbildung zu unterdrücken. Es werden auch verschiedene Bauformen dieser Rollen gezeigt, die in Abbildung 2-19a) abgebildet sind. (Takatori 2018, S. 1,9)

Auch (Ishida & Tada 2012) schlagen den Einsatz von konvexen Walzen vor dem Aufwickeln vor. Wie in Abbildung 2-19b) dargestellt, zeigen die Erfinder die Verwendung von versetzten Rollen jeweils auf der Ober- und Unterseite einer Elektrodenbahn nach dem Kalandrieren (7a, b). (Ishida & Tada 2012, S. 1, 9) Durch die konvexe Form der Walzen hat die Bahn als Erstes in der Mitte der Umlenkrolle Kontakt. So entstehen inhomogene Spannungszustände und Kompressionsfelder, die auch zur Bildung von Falten führen können. (Jacques & Elias et al. 2007, S. 35) Abweichungen des Durchmessers führen weiterhin aufgrund der unterschiedlichen Umfänge zu Geschwindigkeitsunterschieden, die die Bahn ausgleichen muss (Brown 2008, S. 4). Die Funktionsfähigkeit ist demzufolge umstritten.

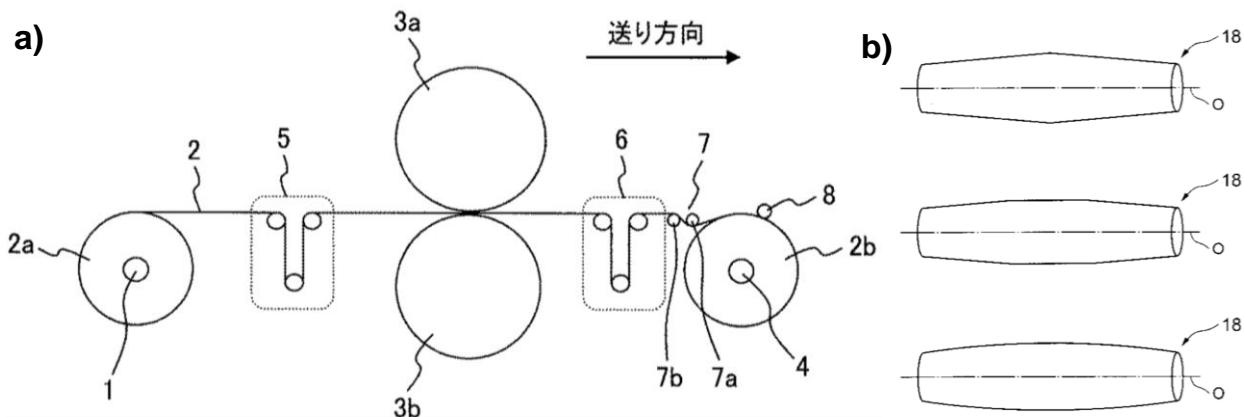


Abbildung 2-19 a) Verschiedene konvexe Walzen, entnommen aus (Ishida & Tada 2012, S. 9) b) Einsatz von konvexen Walzen vor dem Aufwickeln von kalandrierten Elektroden, entnommen aus (Takatori 2018, S. 9)

Das in Abbildung 2-20 dargestellte System basiert auf der Annahme von (Tanaka 2006), dass entlang der Bahnbreite aufgrund des abnehmenden Durchmessers von konvexen Walzen unterschiedliche Bahngeschwindigkeiten bzw. Spannungszustände entstehen, die wiederum Falten hervorrufen können. Um dem entgegenzuwirken, können zusätzliche Rollen aus Metall optional mit einer Gummischicht nach der konvexen Walze an den Rändern der Bahn angebracht werden. Diese sollen die Bahn so deformieren bzw. die Bahnbreite so verringern, dass die Geschwindigkeits- bzw. Spannungsdifferenzen aufgehoben werden. Die zusätzlichen Rollen können verschiedene Anstellwinkel haben sowie die Bahnkanten nach oben oder unten drücken. Die Funktionsfähigkeit des Systems wird für Bahnen aus Polyethylenterephthalat (PET) und Polyethylenaphthalat (PEN) mit der Dicke 5,9 µm nach einem Beschichtungsprozess mit einer nichtmagnetischen Flüssigkeit, welche Kohlenstoff und Eisenoxid enthält, gezeigt.

(Tanaka 2006, S. 6–10) Eine ähnliche Lösung mit Führungsrollen zeigen (Ijima & Mobarra et al. 2005).

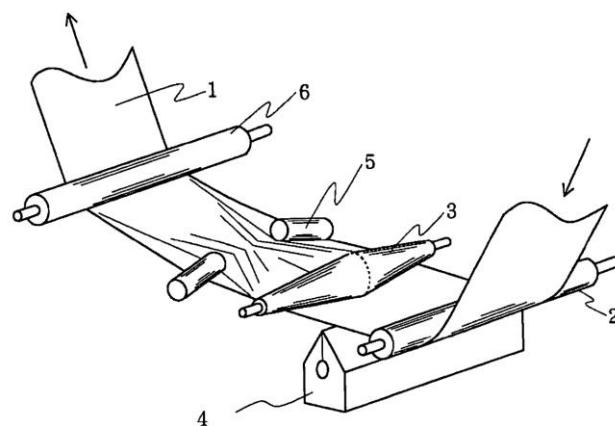


Abbildung 2-20 Führungsrollen zum Ausgleich der Geschwindigkeitsunterschiede beim Einsatz von konvexen Rollen, entnommen aus (Tanaka 2006, S. 2)

Im Gegensatz zu konvexen Rollen zeigt (Genthe 2012), wie in Abbildung 2-21 dargestellt, zwei konische Walzelemente, die jeweils mit der schmaleren Seite zur Mitte hin ausgerichtet sind und auf einer Welle drehbar gelagert sind. Exzenterbuchsen sorgen dafür, dass die Walze insgesamt eine Bogenform erhält. Das System ist für die Textil- und Papierverarbeitung geeignet. (Genthe 2012, S. 2–3) Die kritische Zugspannung, ab der Falten auftreten, wird insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten durch ein sich bildendes Luftkissen erhöht, da die Reibung minimiert wird (Ueda & Hikita et al. 2010, S. 242). (Swanson 1997, S. 420) bescheinigen experimentell, dass die konkaven Rollen die geforderte Spreizfunktion erfüllen.

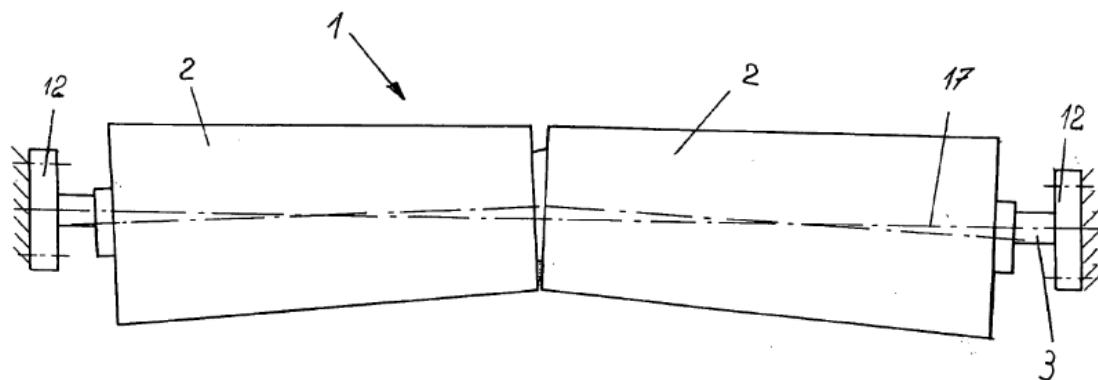


Abbildung 2-21 Gebogene Walze mit konischen Walzelementen, entnommen aus (Genthe 2012, S. 4)

2.6.2 Abgesetzte Walzen

(Fujita 2014) zeigt eine Umlenkrolle für den Einsatz bei Elektroden mit unbeschichtetem Substratrand, die so gefertigt ist, dass sie lediglich den beschichteten Teil der Elektrode berührt. Das Prinzip ist in Abbildung 2-22 dargestellt. (Hotta 2009) zeigt ein ähnliches Verfahren für mehrstreifig beschichtete Elektroden. In diesen Patentschriften sind keine Abbildungen zum Fehlerbild vorhanden und es wird lediglich von „wrinkle“, also Falte, gesprochen. So kann nicht eindeutig zugeordnet werden, um welche Art von Falten es sich handelt.

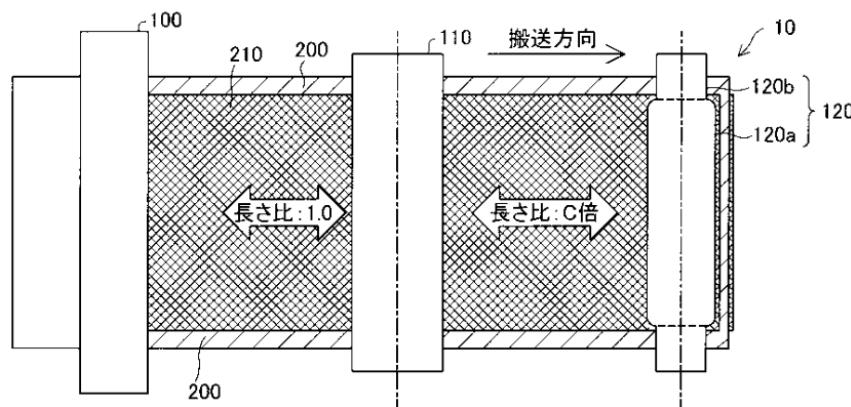


Abbildung 2-22 Umlenkrolle, die lediglich die Beschichtung berührt, entnommen aus (Fujita 2014, S. 1)

Auch in (Suzuki & Ishida et al. 2013, S. 2,13) sind abgesetzte Rollen gezeigt, um die Bahn zu klemmen und so Spannungszustände zu beeinflussen.

2.6.3 Weitere Entwicklungen

(Matsutani 2001) zeigt das in Abbildung 2-23 dargestellte Bandsystem zur Streckung einer Bahn vor der Beschichtung.

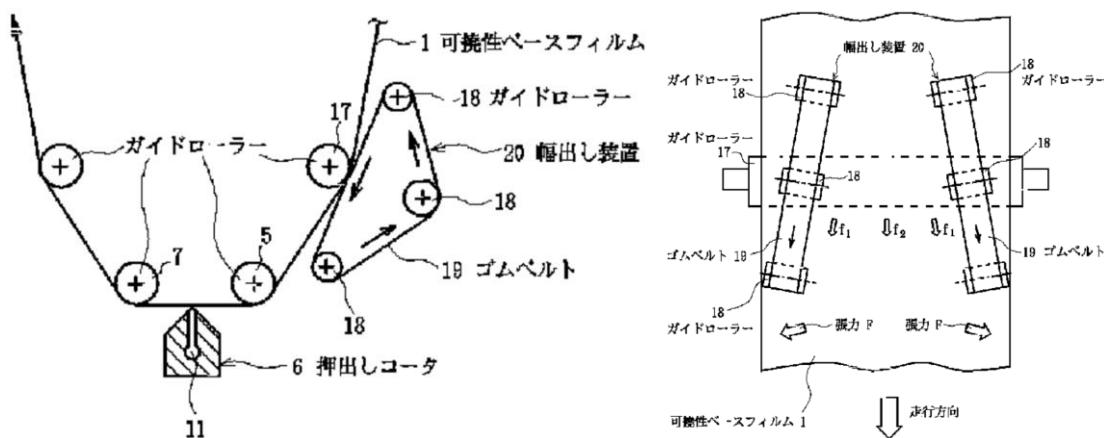


Abbildung 2-23 Bandsystem zur Streckung der Bahn (Matsutani 2001, S. 5)

Ein ähnliches System wird in (Eizo & Yutaka et al. 2000) vorgestellt, welches für das Beschichten eines Trägermaterials mit einem magnetischen Fluid verwendet wird. Hier ist eine gewisse Welligkeit der Trägerbahn eine Herausforderung, weshalb zur Stabilisierung durch das System eine Zugspannung in Querrichtung aufgebracht wird. (Eizo & Yutaka et al. 2000, S. 1–3)

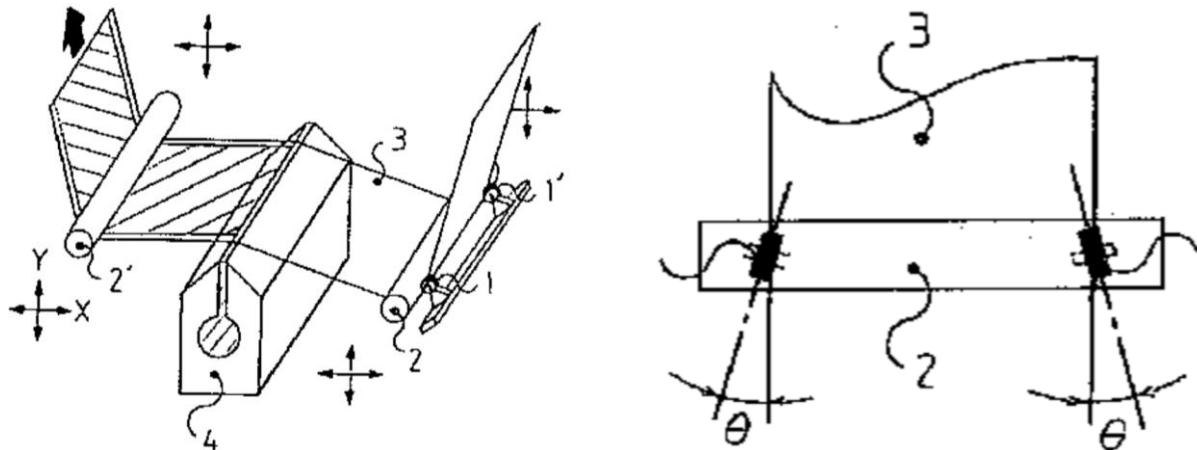


Abbildung 2-24 Stabilisierung einer welligen Bahn, entnommen aus (Eizo & Yutaka et al. 2000, S. 3)

(Yamazaki & Yano et al. 1999) zeigen ein ähnliches System, allerdings mit mehreren Rollen nebeneinander und verteilt über die gesamte Bahnbreite.

In (Roisum 1996, S. 221) wird außerdem auf Kantenstrecksysteme verwiesen. Es werden jedoch keine genaueren Angaben gemacht. Es sind keine weiteren Patente oder Veröffentlichungen zu diesen Systemen bekannt. Auf der Website der Firma „Converter Accessory Corporation“ findet sich eine solche Vorrichtung, die in Abbildung 2-25 gezeigt ist.

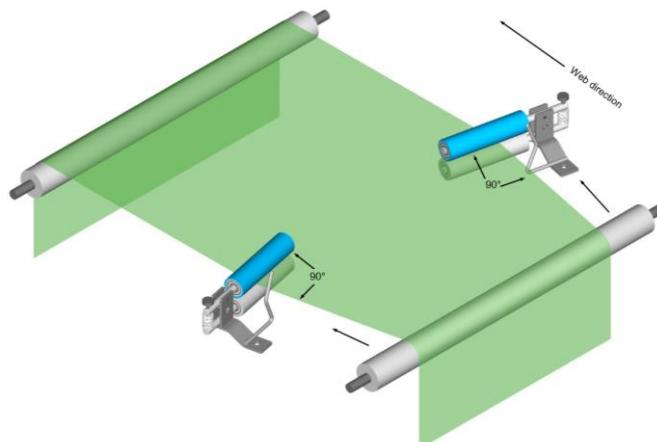


Abbildung 2-25 Kantenstrecksystem der Firma Converter Accessory Corporation (Converter Accessory Corporation o. J., S. 6)

Dabei ist eine der Anpresswalzen aus Gummi gefertigt. Die zusammengezogene Bahn wird durch die Rollenpaare gezwungen, den 90 °-Winkel zur Rollenachse einzunehmen, was eine Streckwirkung hervorruft und Falten verhindert. (Converter Accessory Corporation o. J., S. 6)

Ein weiterer Vorschlag ist die Reduktion der Reibung zwischen Umlenkrolle und Bahn durch geeignete Oberflächen (Brown 2008, S. 1).

Eine andere Option ist das Abkleben der Umlenkrollen mit PTFE-Folie in den Bereichen, in denen die beschichtungsfreien Substratränder der Elektroden laufen. So wird der Substratrand abgestützt. Aus diversen Gesprächen mit Vertretern der Industrie und Wissenschaft kann jedoch kein klares positives oder negatives Fazit über die Funktionsfähigkeit zur Verhinderung der Längsfaltenbildung gezogen werden. Nachteilig ist, dass die Klebestreifen höchst präzise angebracht werden müssen und die Bahn im Betrieb nicht seitlich wandern darf. Aus der eigenen Erfahrung heraus stellt dies eine große Herausforderung dar. Wissenschaftliche Arbeiten zum Abkleben der Umlenkrollen liegen derzeit nicht vor.

2.6.4 Kompensation der Folienverprägung

(Barthel & Bold et al. 2022) stellen ein System zur Minimierung der Folienverprägung vor. Dazu wird über jeweils ein zusätzliches Rollenpaar vor und nach dem Walzspalt eine Dehnung des unbeschichteten Substratrandes hervorgerufen (Barthel & Bold et al. 2022, S. 3). Wissenschaftlich aufgearbeitet wird das System in (Bold 2023).

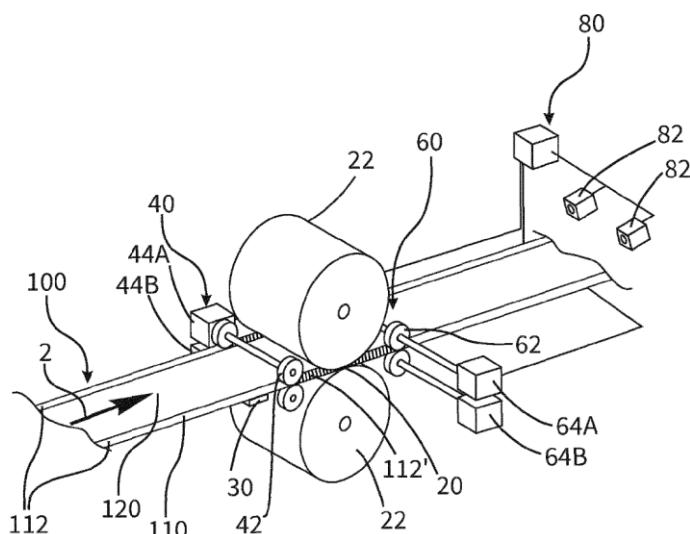


Abbildung 2-26 Vorrichtung zur Minimierung der Folienverprägung (Barthel & Bold et al. 2022, S. 13)

Weiter ist in Forschungs- und Industriekreisen bekannt, dass Induktionsheizungen die Eigenschaften des Al-Substrates so verändern können, dass die Ausbildung der Folienverprägung verhindert wird. Jedoch gibt es zu diesem Zeitpunkt ebenfalls keine wissenschaftlichen Quellen, die diese Effekte systematisch untersuchen.

(Katsuhiko & Shigeru 2016) stellen ein System vor, bei dem jeweils eine Arbeitswalze (vgl. Abbildung 2-27, Nr. 201), die durch zwei weitere Walzen abgestützt ist, an der Ein- und Auslaufseite des Kalanders gegen die Kalanderwalze gedrückt werden. Dies soll dazu dienen, die unbeschichteten Bereiche in die Länge zu strecken und somit den Längenunterschied zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Teil der Elektrode auszugleichen. (Katsuhiko & Shigeru 2016, S. 2,12) Auch hier ist nicht eindeutig belegbar, welche Falten kompensiert werden sollen. Aufgrund der Ähnlichkeit zu (Kim & Zhuge et al. 2020), in der Folienverprägung zu sehen ist, kann davon ausgegangen werden, dass sich das Patent ebenso auf die Folienverprägung bezieht. Auch (Tada & Yamaga et al. 2014) und (Takekuma & Mizuguchi 2014) zeigen Lösungen zur Verminderung von Folienverprägung.

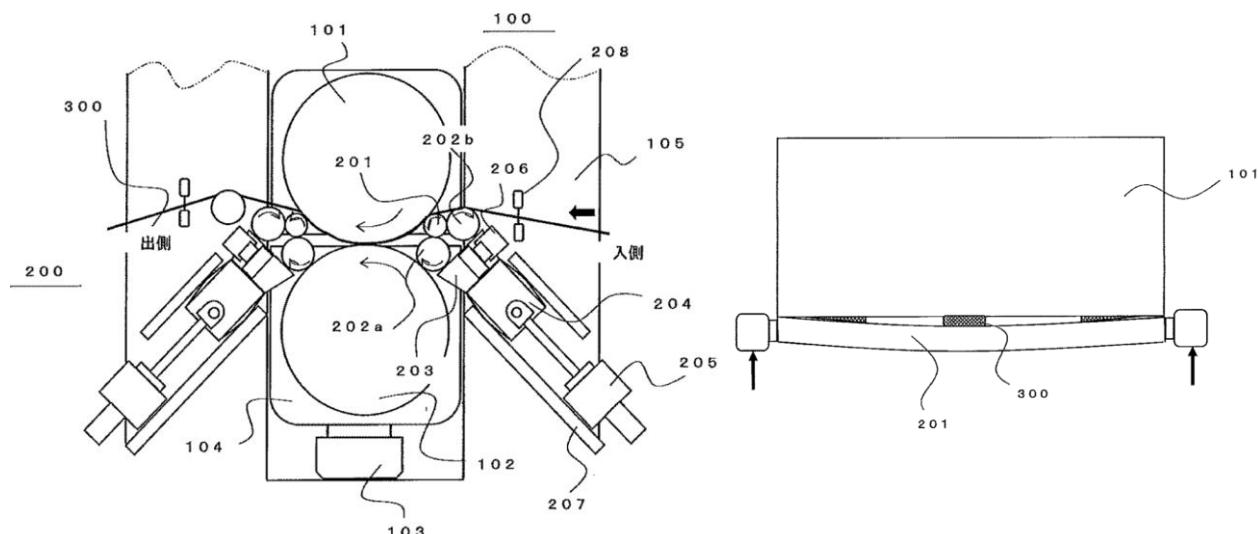


Abbildung 2-27 An die Kalanderwalze angepresste Walzen (Katsuhiko & Shigeru 2016, S. 12)

2.7 Ableitung des Forschungsdefizits

Die Materialkosten und die Länge der Prozesskette sorgen für eine starke Sensitivität gegenüber Produktionsfehlern. Um diese Produktionsfehler unterbinden zu können, ist ein tiefgreifendes Verständnis der komplexen Wirkzusammenhänge zwischen der Elektrode und dem Prozess des Kalandrierens notwendig. Es gibt bereits Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften von Elektroden. Vergleiche zwischen

kalandrierten und unkalandrierten Elektroden sowie der direkte Vergleich verschiedener Materialien mit der gleichen Vorgehensweise sind in der Literatur kaum aufzufinden. Die Längsfaltenbildung bei der Verarbeitung von Folien und Bahnen ist eine bekannte Herausforderung. Es gibt zahlreiche simulative Arbeiten zu Metallfolien und elastischen Materialien, aber keine Studien zu Längsfalten in Elektroden. Obwohl es viele Lösungsansätze zur Vermeidung von Längsfalten in Folien und Bahnen gibt, sind zu diesem Zeitpunkt keine Patente bekannt, die die Längsfaltenbildung in kalandrierten Elektroden vermindern. Weiter liegen keine wissenschaftlichen Publikationen zum Einsatz dieser Lösungen in der Batterieproduktion vor. Auch gibt es kaum wissenschaftliche Arbeiten zur Funktionsweise der bereits existierenden Lösungen.

Neben der Optimierung der Produktion wird auch an neuen Materialsystemen wie der Post-Li-Technologie geforscht. Diese hat das Potenzial, den Limitierungen, die die LIB mit sich bringt, langfristig gerecht werden zu können. Jedoch sind auch für die bereits weit entwickelte NIB derzeit noch keine Standardmaterialien und Prozessroutinen definiert. Ein wissenschaftlicher Vergleich der Produzierbarkeit, insbesondere hinsichtlich des Kalandrierens zwischen LIB und NIB ist zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt, obwohl dies für den schnellen Transfer der Materialien aus dem Labor in eine großskalige Produktion vonnöten wäre.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Dieses Kapitel dient der Präzisierung der Zielsetzung auf Basis des in Kapitel 2.7 dargestellten Forschungsdefizits. Weiter wird ein Überblick über die Vorgehensweise gegeben, auf der die Kapitel 4-7 aufbauen.

3.1 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Dissertation ist die Untersuchung der Längsfaltenbildung als Folge der Kalandrierung von Batterieelektroden unter Berücksichtigung des eingesetzten Materialsystems. Dabei gilt es, das Fehlerbild der Längsfalte in Batterieelektroden zunächst zu definieren und anschließend ein tiefgreifendes Prozessverständnis aufzubauen. Dazu werden die Längsfaltenbildung sowie die Materialeigenschaften der ausgewählten konventionellen LIB-Kathoden in einem definierten Prozessfenster auf Basis experimenteller Daten beschrieben. Der Einbezug der Materialeigenschaften ist notwendig, da die genaue Zusammensetzung der Beschichtung bei zugekauften Elektroden in der Regel nicht bekannt ist. Außerdem bieten sich die Materialeigenschaften als messbare Größen zum Vergleich des Materialverhaltens der Elektroden an und sie lassen auch den Vergleich verschiedener Materialsysteme zu. Weiter sind sie essenziell, um das Verhalten der Elektroden im Kalandrierprozess zu verstehen. Um Ähnlichkeiten und Unterschiede in der Verarbeitung von neuen Materialsystemen aufzuzeigen und zu quantifizieren, werden ausgewählte Untersuchungen an verschiedenen Anoden für NIB durchgeführt. Somit kann abgeschätzt werden, inwieweit ein Wissenstransfer von konventionellen Elektroden für LIB hin zu neuen Materialsystemen möglich ist. Aufgrund der in Kapitel 2.4 beschriebenen Anforderungen an den Kalandrierprozess kann die Längsfaltenbildung nicht durch eine Veränderung des Prozessfensters vermindert werden. Es folgt daher die Forderung nach einer anlagenseitigen Erweiterung zur Reduktion der Längsfaltenbildung, für die ein Vorschlag erarbeitet wird.

Diese Dissertation leistet somit einen Beitrag zur Erweiterung des Material- und Prozessverständnisses und zeigt Möglichkeiten zur material- und prozessgrößenunabhängigen Reduktion der Längsfaltenbildung auf. Somit kann die Ausschussrate bei der Herstellung von Batteriezellen künftig minimiert werden.

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden forschungsleitenden Fragestellungen:

- Wie können Längsfalten charakterisiert werden?

- Welchen Einfluss hat das Kalandrieren auf die Materialeigenschaften?
- Wie nehmen Material- und Prozessgrößen Einfluss auf die Bildung der Längsfalten?
- Ist der Transfer des für Stand-der-Technik-Elektroden generierten Prozessverständnisses auf neue Materialien wie NIB-Kathoden möglich?
- Wie sieht eine materialunabhängige, anlagenseitige Maßnahme zur Reduktion der Längsfaltenbildung aus?

3.2 Vorgehensweise

Zur Beantwortung der in Kapitel 3.1 gestellten Forschungsfragen leitet sich die folgende Vorgehensweise ab:

Zunächst erfolgt die Analyse der Längsfaltenbildung, welche in Kapitel 4 beschrieben wird. Das System aus Kalander und Elektrode wird definiert und die Einflussgrößen werden dargelegt. Anschließend erfolgt die geometrische Beschreibung der Längsfalten, aus der sich die charakteristischen Merkmale der Längsfalte ableiten. Weiter werden die Methodik zur Datenaufnahme und Ableitung der Kenngrößen sowie die mechanische Charakterisierung der Elektroden beschrieben. Zuletzt wird die Wahl der Versuchspläne erläutert.

Anschließend werden in Kapitel 5 die Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften, Prozessgrößen und der Längsfaltenbildung erläutert. Die Zusammenhänge werden anhand der in Kapitel 4 beschriebenen Versuchspläne und Methodiken experimentell ermittelt. Die Grundlage bilden zwei NMC811-Kathoden mit verschiedenen breiten unbeschichteten Substraträndern und eine LFP-Kathode. Dies ermöglicht es, auch das Format der Elektrode zu berücksichtigen. Für die Charakterisierung werden Längsfalten in den genannten Kathoden für LIB erzeugt und hinsichtlich ihrer Kenngrößen in Abhängigkeit der Prozessgrößen charakterisiert. Weiter werden ihre Materialeigenschaften ebenfalls in Abhängigkeit der Prozessgrößen bestimmt, sodass diese zuletzt in Relation zu den Kenngrößen der Längsfalte gesetzt werden können. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage für die Beschreibung der Einflüsse auf die Längsfaltenbildung sowie die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von den Prozessgrößen der ausgewählten konventionellen LIB-Kathoden in einem definierten Prozessfenster.

In Kapitel 6 werden anschließend Kalandrierversuche an HC-Anoden verschiedener Beschichtungsformate und Beladungen durchgeführt. Weiter wird das mechanische Materialverhalten charakterisiert. Analog zu Kapitel 5 werden Zusammenhänge

gebildet, die mit denen für LIB verglichen werden. So lassen sich zum einen Aussagen über die Kalandrierbarkeit der HC-Anoden treffen und zum anderen kann die Übertragbarkeit der bereits gefundenen Zusammenhänge auf Elektroden für NIB abgeschätzt werden.

Zuletzt wird in Kapitel 7 die Entwicklung einer Vorrichtung zur Reduktion der Längsfaltenbildung dargestellt. Eine Verminderung der Längsfaltenbildung über die Prozessgrößen ist zwar möglich, dies setzt jedoch ein Verlassen des Zielprozessfensters voraus. Abhilfe soll daher eine Vorrichtung schaffen, die die Bildung der Längsfalten im gegebenen Prozessfenster durch mechanisches Eingreifen reduziert. Aufgrund der nur in geringen Mengen verfügbaren Elektroden für NIB wird für die Validierung eine NMC811-Kathode eingesetzt.

4 Analyse der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens

Ziel dieses Kapitels ist die Analyse des Gesamtsystems. Weiter werden die Längsfalten in Elektroden erstmals systematisch beschrieben und die zugehörige Methodik zur Charakterisierung wird dargelegt. Zuletzt werden alle weiteren verwendeten Messsysteme und entwickelten Auswerteroutinen eingeführt und die Versuchsplanung erläutert.

4.1 Systemanalyse

Aus dem Stand der Technik und Forschung in Kapitel 2 ergibt sich das in Abbildung 4-1 dargestellte, auf die wesentlichen Einflussfaktoren beschränkte Zielsystem.

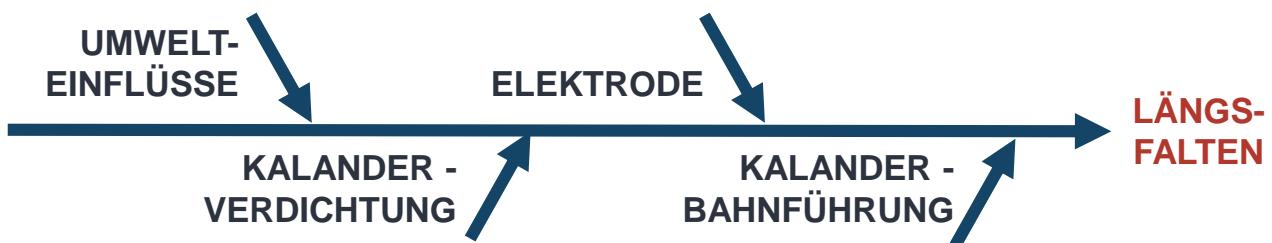


Abbildung 4-1 Überblick über die wesentlichen Einflussfaktoren

In Tabelle 4-1 sind die relevantesten Größen der Einflussfaktoren auf die Längsfaltenbildung aufgelistet und farblich nach der Beeinflussbarkeit gekennzeichnet.

Tabelle 4-1 Liste der relevantesten Größen der Einflussfaktoren, grau: unveränderlich, grün: einstellbar, gelb: abhängig

Umwelteinflüsse	Verdichtung	Bahnführung	Elektrode
Umgebungstemperatur	Linienlast	Bahnzug	Zusammensetzung
Umgebungsfeuchtigkeit	Walzentemperatur Walzendurchmesser	Geschwindigkeit Umlenkradius Umlenkinkel Ausrichtung der Umlenkrollen Ausrichtung der Bahn	Substrat Format Schichtdicke Dichte Mechanische Eigenschaften

Im Folgenden werden der verwendete Kalander sowie die untersuchten Elektroden im Detail beschrieben. Da die Umwelteinflüsse, also die Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Technikum nicht beeinflussbar sind, werden diese nicht weiter berücksichtigt.

4.1.1 Kalander

Der Kalander, der für die vorliegende Arbeit zum Einsatz kam, ist das Modell GKL 500 MS (SAUERESSIG Group, Matthews Europe GmbH). Abbildung 4-2 zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaus des Kalanders.

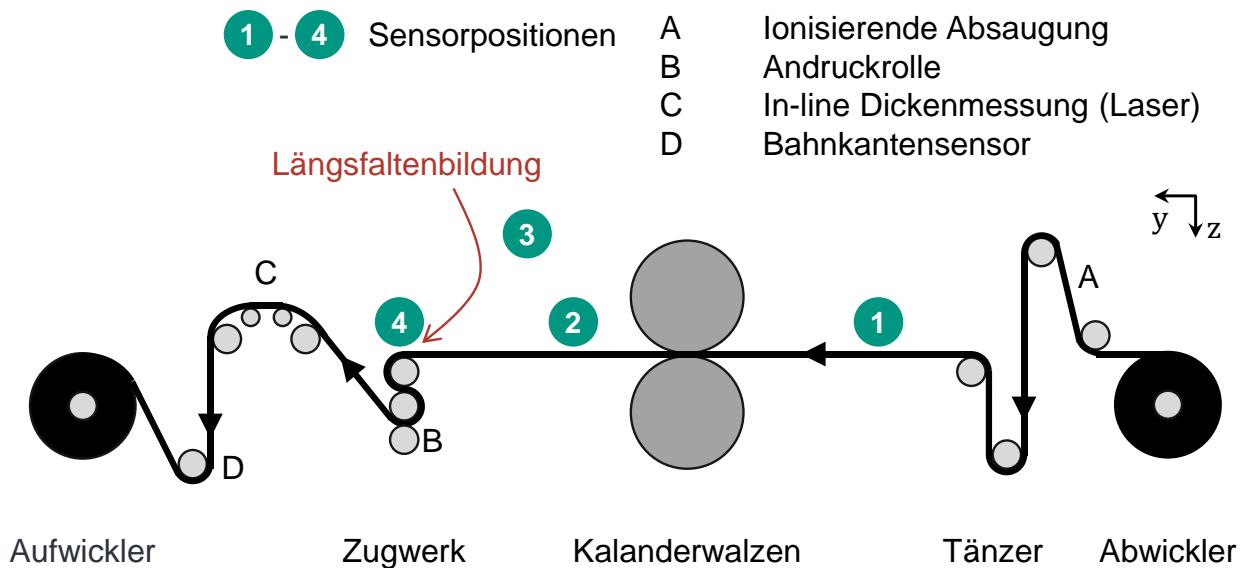


Abbildung 4-2 Schematische Darstellung des GKL 500 MS mit eingespannter Elektrode nach (SAUERESSIG GmbH + Co. KG 2013, S. 54) und Positionen zur Messdatenerfassung

Der Elektrodenwickel wird auf dem Abwickler aufgespannt und die Elektrodenbahn wird über Umlenkrollen durch eine ionisierende Absaugung (A) geführt. Die Bahn wird weiter über die Tänzerrolle gefördert, die durch ihre Auf- und Abbewegung für eine konstante Bahnspannung sorgt. Anschließend wird die Bahn horizontal zwischen den beiden Kalanderalzen hindurchgeführt und erst am Zugwerk wieder umgelenkt. Das Zugwerk beschreibt eine S-förmige Bahnhörung und die Elektrode wird durch eine Andruckrolle (B) an die untere Umlenkrolle des Zugwerks gepresst. Die In-line-Dickenmessung (C) erfolgt mittels Lasertriangulation (Kurschat GmbH Messtechnik + Automation), bevor die Elektrodenbahn durch den Bahnkantensor (D) geführt wird. Dieser sorgt dafür, dass sich der Aufwickelbock je nach Bewegung der Bahn nach links oder rechts bewegt, um Teleskopie zu vermeiden. (SAUERESSIG GmbH + Co. KG 2013, S. 18–20)

An den Positionen 1 bis 4 werden Sensoren angebracht, die in Kapitel 4.2 detailliert beschrieben werden.

Die Linienlast wird anhand der erforderlichen Zieldichte oder Zieldicke über die Position der Hauptzylinder sowie die Kraft an den Roll-Bending-Zylindern eingestellt. Die Kalanderwalzen sind durch eine Wassertemperierung beheizbar. Einen Überblick über die relevanten und einstellbaren Prozessgrößen gibt Tabelle 4-2. Der Durchmesser der Kalanderwalzen beträgt 700 mm bei einer Breite von 500 mm. Die maximale Bahnbreite beträgt 400 mm mit einer maximalen Beschichtungsbreite von 350 mm. (SAUERESSIG GmbH + Co. KG 2013, S. 15–16)

Tabelle 4-2 Relevante einstellbare Prozessparameter beim Kalandrieren, entnommen aus der Betriebsanleitung (SAUERESSIG GmbH + Co. KG 2013, S. 15–16) und ergänzt um eigene Erfahrungswerte

	Einheit	Minimum	Maximum
Bahnzug Abwickler	N	20	150
Bahnzug Zugwerk	N	1	-
Bahnzug Aufwickler	N	50	250
Linienlast	N·mm ⁻¹	-	2.000
Temperatur Walzen	°C	Raumtemperatur	90
Geschwindigkeit	m·min ⁻¹	1	30

4.1.2 Elektroden

Für die Durchführung der Versuche werden für die LIB stellvertretend eine LFP- und zwei NMC811-Kathoden verwendet, deren Eigenschaften Tabelle 4-3 zu entnehmen sind. Alle drei Kathoden wurden durch Enertech International, Inc. hergestellt. Die Beschichtung wurde auf ein 15 µm dickes Al-Substrat mit der Beschichtungsbreite 155 mm doppelseitig aufgetragen. Alle drei Kathoden haben einen symmetrischen, unbeschichteten Substratrand. Die beiden NMC811-Kathoden sollen laut dem Hersteller eine Massenbeladung bzw. ein Flächengewicht M von 41,6 g·cm⁻² aufweisen und gleichartig hergestellt worden sein. Die Werte aus der Tabelle entsprechen den gemessenen Werten. Sie unterscheiden sich also theoretisch nur durch die Breite des unbeschichteten Substrats b_{Sub} , welche 30 mm und 50 mm beträgt. Im Folgenden werden daher „NMC_30“ und „NMC_50“ sowie „LFP_50“ als vereinfachende Bezeichnungen verwendet. Die Zusammensetzung der NMC_30-Kathoden ist mit 94 Gew.-% Aktivmaterial, 3 Gew.-% Ruß und 3 Gew.-% PVDF bekannt. Für NMC_50 und LFP_50, welche zeitlich nach den NMC_30-Kathoden produziert wurden, ist mit 10-20 % Al (Substrat),

70-90 % Aktivmaterial, < 5 % PVDF und < 10 % Ruß lediglich eine grobe Zusammensetzung der Gesamtelektrode durch den Hersteller angegeben worden. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Zusammensetzung nicht geändert wurde. Weiter ist festzustellen, dass die LFP-Beschichtung eine geringere Dichte und damit eine etwas geringere Flächenbeladung bei gleichzeitig größerer Beschichtungsdicke hat. (Mayer & Wurba et al. 2021, S. 3; Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 2; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 315)

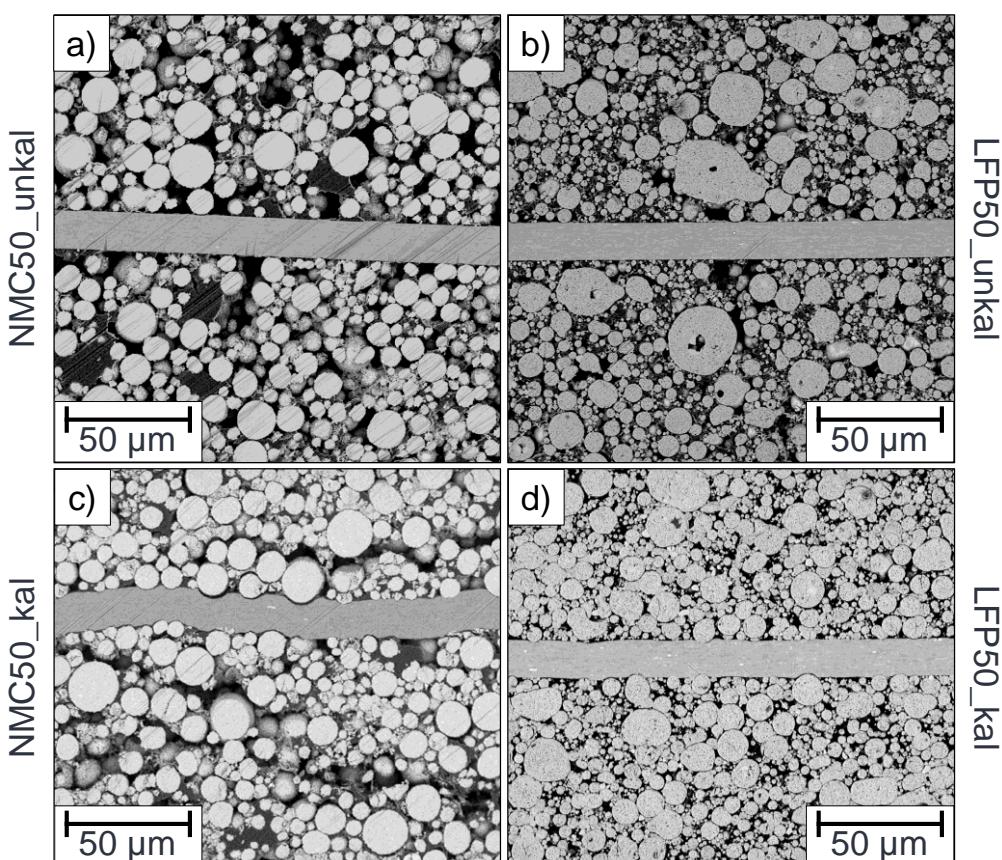
Tabelle 4-3 Übersicht über die sich unterscheidenden Parameter der verwendeten LIB-Kathoden im unkalandrierten Zustand, entnommen aus (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 2; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 315)

Bezeichnung	Aktivmaterial	$M / \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	$d_B / \mu\text{m}$	$\rho_B / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	b_{Sub} / mm
NMC_30	NMC811	40,9	188,0	2,17	30
NMC_50	NMC811	41,7	191,5	2,18	50
LFP_50	LFP	37,9	224,7	1,69	50

Abbildung 4-3 zeigt mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) vergrößerte Querschnitte der unkalandrierten (unkal.) und maximal kalandrierten (max. kal., vgl. Kapitel 4.4.1) NMC_50- und LFP_50-Kathoden. Die Proben wurden mit dem Argon-Ionen-Cutter EM TIC 3X (Leica Microsystems GmbH) geschnitten, während die REM-Aufnahmen mit dem Phenom ProX (Thermo Fisher Scientific Inc.) erstellt wurden.

Die Partikelgrößenverteilung der LFP-Partikel scheint breiter zu sein als die der NMC811-Partikel. Es gibt einige sehr große Partikel mit einem Durchmesser von etwa 20 – 30 μm , einige um ca. 10 μm und viele deutlich kleinere Partikel, die ebenfalls in ihrer Größe variieren. In der NMC_50-Kathode gibt es keine auffallend großen Partikel, dafür aber einen großen Anteil mit einem Durchmesser zwischen 10 und 15 μm , während die restlichen Partikel einen Durchmesser von etwa 5 μm aufweisen. Außerdem sind große Nester aus Binder und Leitruß zu erkennen. In der LFP-Beschichtung scheinen Binder und Leitruß gleichmäßiger verteilt zu sein. Insbesondere die sehr großen LFP-Partikel sind nicht perfekt kugelförmig und auch die kleineren LFP-Partikel sind weniger kugelförmig als die NMC811-Partikel. Darüber hinaus weisen einige der LFP-Partikel Poren innerhalb der Partikel auf, während die Poren zwischen den Partikeln in der NMC_50-Beschichtung größer zu sein scheinen. Bei beiden kalandrierten Elektroden dringen die Partikel in das Substrat ein. In der NMC_50-Beschichtung ist dies bei fast allen Partikeln, die Kontakt zum Substrat haben, unabhängig von ihrer Größe der

Fall. Das Substrat der NMC_50-Kathode ist deutlich erkennbar verformt. In der LFP_50-Beschichtung wird das Eindringen hauptsächlich bei einigen größeren Partikeln beobachtet, während dieser Effekt bei kleinen Partikeln eher weniger auftritt. Daher ist die Verformung des Substrats wesentlich geringer ausgeprägt. Im Gegensatz dazu werden einige LFP-Partikel stark verformt, vor allem wenn sie mit anderen Partikeln in Kontakt kamen. Die NMC811-Partikel verformen sich nicht, einige von ihnen weisen allerdings Risse auf. (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3)



*Abbildung 4-3 REM-Aufnahmen der LIB-Kathoden bei 1500-facher Vergrößerung
(Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3)*

Für den Technologievergleich werden HC-Anoden für NIB aufgrund der Materialverfügbarkeit eingesetzt, die von Cidetec Energy Storage hergestellt wurden. Die NIB-Anoden sind aufgrund ihres Al-Substrats für einen Vergleich des Einflusses des Beschichtungsmaterials geeignet. Die Zusammensetzung wurde für alle Anoden auf 93,0 Gew.-% HC (BHC-400, Shandong Gelon LIB Co., Ltd.), 1,4 Gew.-% Ruß, 1,87 Gew.-% CMC und 3,73 Gew.-% SBR festgelegt. Die Elektroden wurden doppelseitig auf dem Pilotbeschichteter BC39 (Coatema Coating Machinery GmbH) beschichtet. (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 315)

Tabelle 4-4 zeigt die gemessenen Eigenschaften der Anoden im unkalandrierten Zustand. Die Anoden werden anhand ihrer Soll-Eigenschaften bezeichnet. Dabei enthält die Bezeichnung das Soll-Flächengewicht, die Substratdicke und zuletzt die Soll-Beschichtungsbreite. Die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zustand sind teilweise auf Messungenauigkeiten zurückzuführen, größtenteils entstanden sie aber während der Herstellung der Anoden.

Tabelle 4-4 Übersicht über die sich unterscheidenden Parameter der verwendeten NIB-Anoden im unkalandrierten Zustand

Bezeichnung	$M / \text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	$d_B / \mu\text{m}$	$\rho_B / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	b_B / mm	b_{Sub} / mm	$d_S / \mu\text{m}$
HC_20_15_155	19,91	226,17	0,88	153	46	15
HC_25_15_155	25,07	278,33	0,94	152	49	15
HC_25_12_155	22,97	288,58	0,81	154	48	12
HC_25_15_120	22,63	292,5	0,79	120	65	15

Die berechneten Anteile der Breite der symmetrischen unbeschichteten Substratränder b_{Sub} an der Gesamtelektrodenbreite b_E finden sich in Tabelle 4-5.

Tabelle 4-5 Überblick über die tatsächlichen Abmessungen der HC-Anoden und Anteil der Ableiterbreite an der Gesamtelektrodenbreite

	b_B / mm	b_{Sub} / mm	$2b_{Sub} \cdot b_E^{-1} / \%$
HC_20_15_155	153	46	37,6
HC_25_15_155	152	49	39,2
HC_25_12_155	154	48	38,4
HC_25_15_120	120	65	52,0

Die Abweichungen der Ist-Beschichtungsbreite von der Soll-Beschichtungsbreite entstanden bereits im Herstellungsprozess.

Abbildung 4-4 zeigt exemplarische Querschnitte der HC-Anoden. Die Partikelmorphologie, also die Form der Partikel, ist dabei völlig anders als die der LIB-Kathoden. Sie kann keiner eindeutigen Geometrie zugeordnet werden und ist überwiegend eher länglich und teilweise abgerundet, aber teilweise auch mit scharfen Kanten versehen und

eher eckig. Auch die Partikelgrößenverteilung ist eher weit und die Partikel scheinen teilweise nahezu zu verschmelzen.

Vereinzelt sind das leichte Eindringen spitzer Kanten von Partikeln in das Substrat sowie Delaminationen bzw. Risse innerhalb der Beschichtung zu erkennen. Dabei ist nie ganz auszuschließen, dass diese durch die Probenpräparation hervorgerufen wurden.

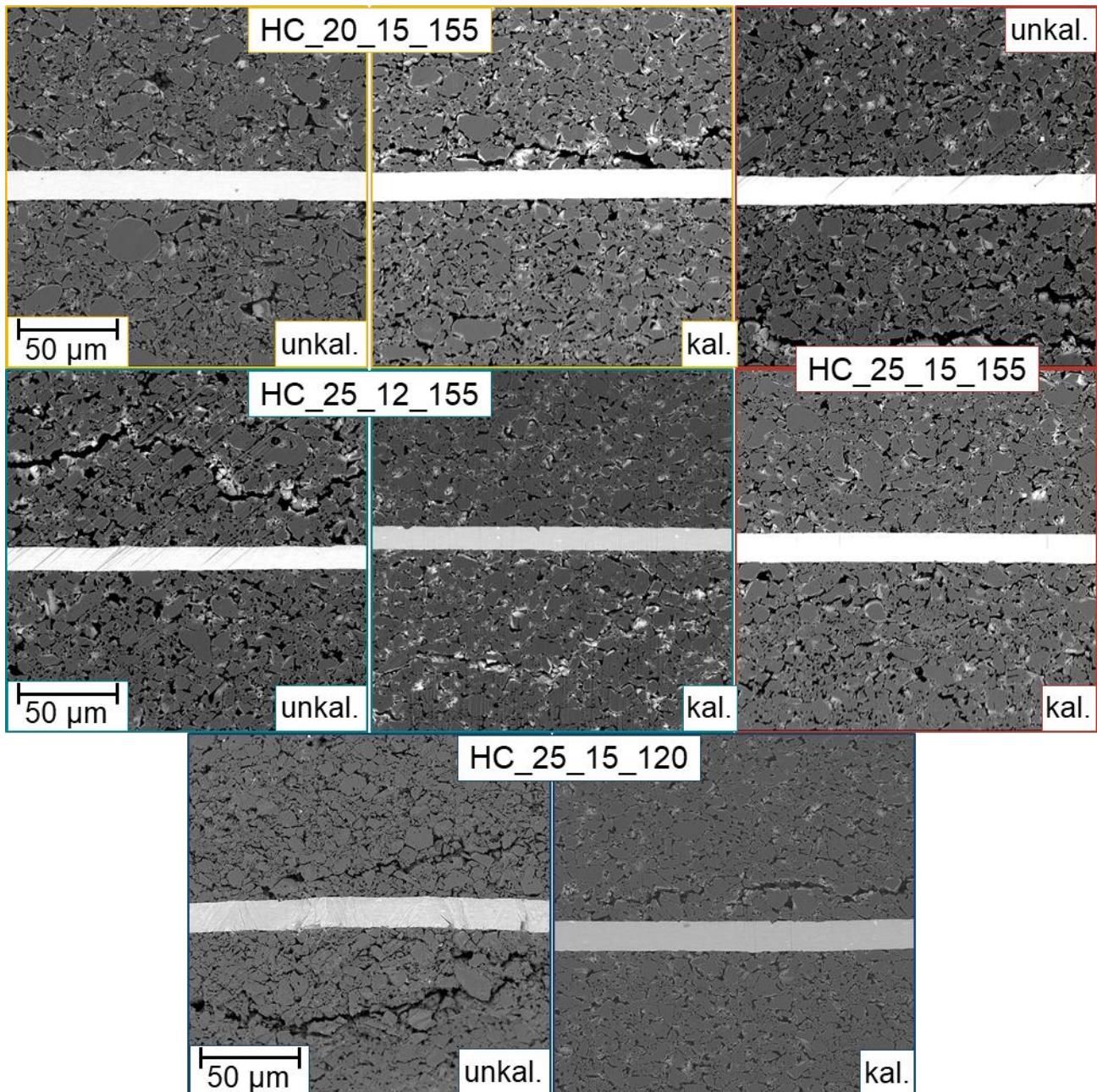


Abbildung 4-4 Exemplarische REM-Aufnahmen der HC-Anoden bei 1500-facher Vergrößerung

4.1.3 Geometrische Beschreibung der Längsfalten

Die folgende Definition der Längsfalten wurde erstmals im Rahmen der angeleiteten Bachelorarbeiten (A_Altmann 2022; A_Reusch 2023) vorgenommen und in (Wurba & Klemens et al. 2023) veröffentlicht.

Längsfalten in Elektroden sind bogenförmige, irreversible, plastische Verformungen, die überwiegend im unbeschichteten Bereich des Substrats parallel zur Laufrichtung auftreten. Abbildung 4-5a) zeigt ein Foto und b) einen 3D-Scan einer NMC811-Kathode, die über die erste Umlenkrolle nach der Verdichtung geführt wird. Die Laufrichtung liegt in dieser, wie in allen folgenden Abbildungen, in y-Richtung. In dem weiß umrahmten Bereich bilden sich die Längsfalten. Der angedeutete Profilschnitt im 3D-Scan wird für die Auswertung der Geometrie benötigt, die in Kapitel 4.2 genauer dargestellt ist.

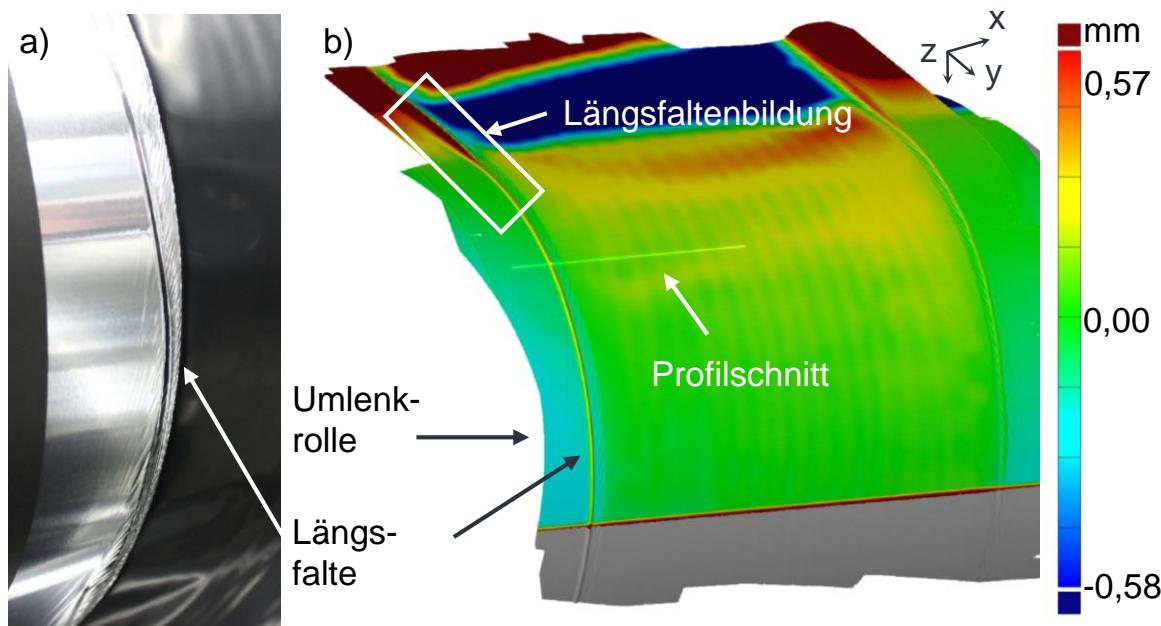


Abbildung 4-5 Bildung einer Längsfalte a) Foto b) 3D-Scan mit farblich gekennzeichneter Profilhöhe (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 316)

Die Längsfalten werden in dieser Arbeit anhand ihrer Geometrie charakterisiert. Dazu zählen die Höhe h_L und Breite b_L der Längsfalte, sowie ihre Position, die in Form der Distanz zwischen Beschichtungskante und Längsfalte d_L definiert ist. Abbildung 4-6 zeigt ein Profil einer Längsfalte mit den Bezugspunkten, die zur Berechnung der Geometrie benötigt werden. Der Punkt P_{BK} zeigt die Beschichtungskante, also den Übergang zwischen Beschichtung und unbeschichtetem Substrat, an. Die Punkte $P_{B1,L}$ und $P_{B2,L}$ markieren die linke und rechte Begrenzung der Längsfalte zur Bestimmung der Breite anhand der Differenz der x-Werte (vgl. Formel 4-1).

$$b_L = x(P_{B2,L}) - x(P_{B1,L}) \quad 4-1$$

Die Höhe h_L ist definiert als der Abstand zwischen dem z-Wert der Spitze der Längsfalte $z(P_{S,L})$ und dem z-Wert des Begrenzungspunktes der Längsfalte (vgl. Formel 4-2). Dieser befindet sich auf der Seite ohne Beschichtung, da hier keine Beeinträchtigung durch die Folienverprägung vorliegt.

$$h_L = z(P_{S,L}) - z(P_{B2,L}) \quad 4-2$$

Die Distanz berechnet sich wie in Formel 4-5 aus der Differenz zwischen dem x-Wert der Beschichtungskante $x(P_{BK})$ und dem x-Wert der Spitze der Längsfalte $x(P_{S,L})$.

$$d_L = x(P_{BK}) - x(P_{S,L}) \quad 4-3$$

(A_Altmann 2022, S. 119; A_Reusch 2023, S. 41; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 316)

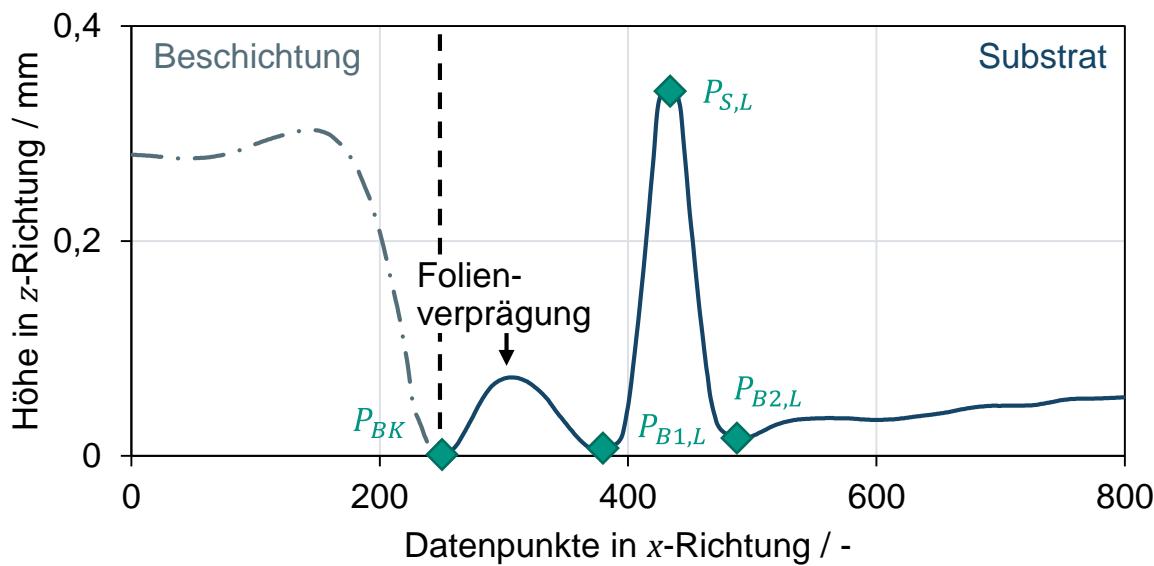


Abbildung 4-6 Profil einer Längsfalte mit den relevanten Bezugspunkten, entnommen aus einem Laserdatensatz nach (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 316)

Zusätzlich wird die approximierte Faltenfläche $A_{L,approx.}$ der Längsfalte eingeführt. Sie ist in Abbildung 4-7 rot markiert und beschreibt den freien Bereich zwischen der Längsfalte und der Umlenkrolle. Wie abgebildet, wird sie aus der Höhe h_L und der Breite b_L berechnet. Eine größere Faltenfläche $A_{L,approx.}$ ist mit einem größeren Anteil an

Substrat verbunden, das in Form einer Längsfalte gebunden ist. (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 500)

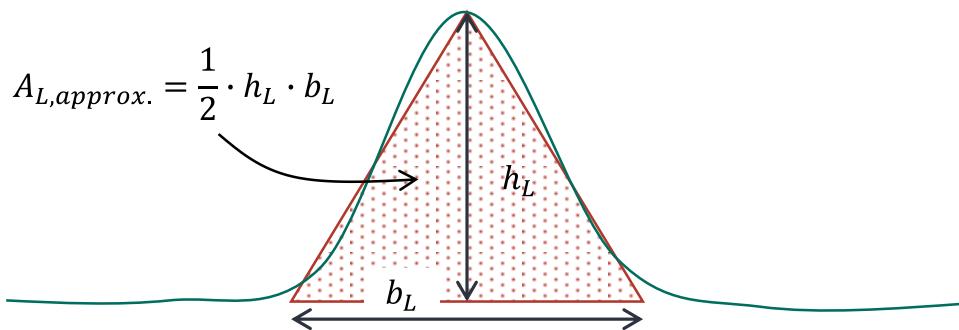


Abbildung 4-7 Definition der approximierten Fläche der Längsfalte $A_{LF, \text{approx.}}$.

4.1.4 Untersuchung des Zielsystems

Nachdem nun das Zielsystem, bestehend aus Kalander, Elektroden und Längsfalten eingeführt wurde, wird im Folgenden ein Überblick über die Durchführung der Versuche gegeben. Während der Kalandrierversuche wird die Geometrie der Längsfalte aufgezeichnet, analysiert und mit den Prozessparametern korreliert. Die genaue Beschreibung der Versuchsdurchführung erfolgt in Kapitel 4.2. Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, werden Elektroden ausgewählt, die sich in ihren Materialeigenschaften unterscheiden. Anhand gezielter Materialprüfungen können diese unterschiedlichen Elektroden dennoch verglichen werden und ihr Einfluss auf die Ausprägung der Längsfalte kann quantifiziert werden. Die kalandrierten und unkalandrierten Elektroden werden daher einer Materialprüfung unterzogen. Die gewonnenen Daten werden ebenfalls mit den Prozessparametern korreliert und zuletzt auch mit der Längsfaltengeometrie. Die Vorgehensweise ist in Kapitel 4.3 zu finden. Die Versuchsplanung und statistische Auswertung wird in Kapitel 4.4 erläutert.

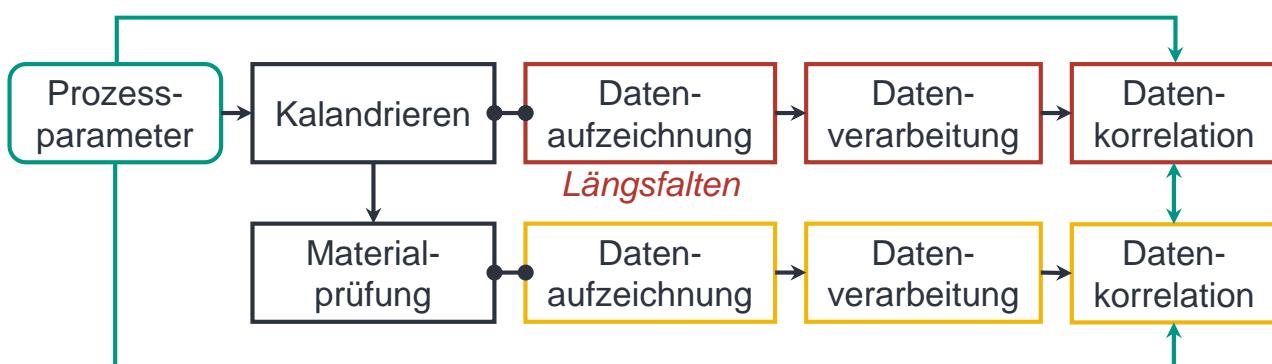


Abbildung 4-8 Überblick über die Untersuchung des Zielsystems

4.2 Methodik zur Untersuchung der Längsfaltenbildung

Die hier gezeigte Methodik inklusive Validierung ist in Teilen ebenfalls im Rahmen der angeleiteten Bachelorarbeiten (A_Altmann 2022; A_Reusch 2023) entstanden und in (Wurba & Klemens et al. 2023) publiziert worden.

4.2.1 Datenaufnahme

Die Elektroden werden unter dem im Versuchsplan vorgesehenen Parametersatz kalandriert. Für das Erreichen der korrekten Dichte wird eine iterative Adaption des Kalanderspaltes gewählt. Da die Dichte nicht direkt gemessen werden kann, wird sie über die Messung des Flächengewichts und der Dicke der Beschichtung analog zu Formel 2-5 berechnet. Mithilfe der Elektrodenstanze EL-Cut (EL-Cell GmbH) mit einem Durchmesser von 18 mm werden kreisrunde Proben ausgestanzt. Für die Bestimmung der Dicke der Elektrode wird die taktile Messuhr MarCator 1075R (Mahr GmbH) verwendet. Die Dicke des Substrats ist durch den Hersteller bekannt. Das Gewicht der Elektroden und des Substrats wird mithilfe der Feinwaage EW 220-3NM (KERN & SOHN GmbH, Balingen-Frommern) gemessen. (Bold 2023, S. 63–64; Mayer & Wurba et al. 2021, S. 4)

Die Geometrie der Längsfalte wird mithilfe des optischen 3D-Scanners ATOS Core (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH) und des Lasersensors LJ-V7060B (Keyence Deutschland GmbH) an der ersten Umlenkrolle nach der Verdichtung (Position 4 in Abbildung 4-2) aufgezeichnet. (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 315–316) Beide Sensoren sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

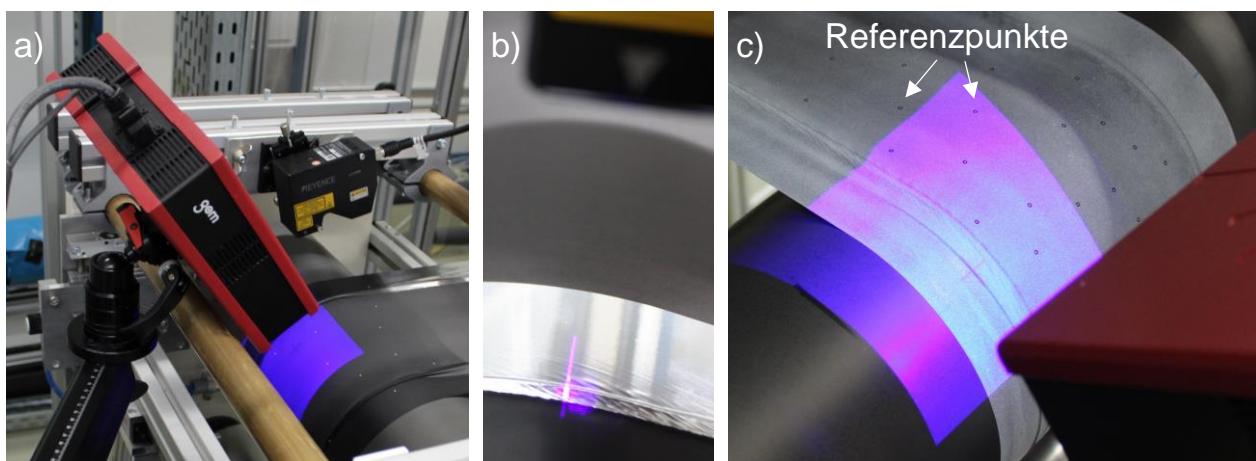


Abbildung 4-9 a) Laser und 3D-Scanner in ihrer Aufnahmeposition, b) Laserstrahl auf der Elektrode, c) Messfeld des 3D-Scanners auf der Elektrode mit Referenzpunkten

Der Linien-Lasersensor LJ-V7060B wird direkt über der Elektrode fest installiert, daher muss die Bahn für die Messung in Bewegung sein. Das Messprinzip basiert auf der Lasertriangulation. Pro Messung werden 10.000 Profile mit einer Breite von 15 mm und einer Frequenz von 500 Hz aufgezeichnet. Anschließend wird der Datensatz aus der Software LJ-X Navigator (Keyence Deutschland GmbH) als CSV-Datei exportiert und für die Weiterverarbeitung gespeichert. (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 315–316)

Für das Einstellen der Elektrode an der Umlenkrolle wird die Elektrode angehalten. Der Sensor enthält zwei Kameras und einen Projektor, der blaues, schmalbandiges LED-Licht bei einem Messfeld von $135 \times 100 \text{ mm}^2$ ausstrahlt (GOM mbH 2014, S. 7–8). Das Messfeld ist zu klein, um die Elektrode auf der Umlenkrolle direkt einzuscannen. Außerdem schränken die Sensorik und die dazu gehörenden Tragstrukturen das Sichtfeld auf die Elektrode ein. Daher ist der Sensor rotierbar auf einem Stativ befestigt. Durch die Bewegung des Sensors und durch die Kopplung mehrerer Bildabschnitte kann die gesamte Oberfläche der Elektrode aufgenommen werden. Mithilfe von Referenzpunkten, die in unregelmäßigen Abständen auf die Elektrode geklebt werden, ist es in der zugehörigen Software möglich, den räumlichen Zusammenhang zwischen den Einzelaufnahmen herzustellen. Das Referenzpunktgemuster ist in Abbildung 4-9c) gekennzeichnet. (A_Altmann 2022, S. 32–34; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 315–317)

Weiter ist in Abbildung 4-9a) zu erkennen, dass die Elektrode am unbeschichteten Substratrand schwarz und auf der Beschichtung leicht weiß besprüht ist. Dies führt zu einer Reduktion von Reflexionen auf dem unbeschichteten Substrat und der Beschichtung und kann für die Datenaufnahme von Vorteil sein. (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317) Es bietet sich daher an, die bereits für die Dehnungsaufnahmen (vgl. Kapitel 4.3.1) besprühten Flächen erneut zu verwenden, wie es in Abbildung 4-9b) der Fall ist.

In Abbildung 4-10a) ist zu sehen, wie in der Software GOM Inspect (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH) ein 3D-Netz der Elektrode auf der Umlenkrolle generiert wird. Für die Auswertung wird ein Referenzkörper benötigt, der in diesem Fall ein Zylinder ist. Die radialen Abweichungen von diesem Zylinder ergeben dann das Profil der umschlungenen Elektrode (vgl. Abbildung 4-10b)). Es werden mindestens 15 bis 20 Profile der Elektrode generiert und als CSV-Datei exportiert. Dabei können unvollständige Profile direkt ausgeschlossen werden. (A_Reusch 2023, S. 38–39; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317)

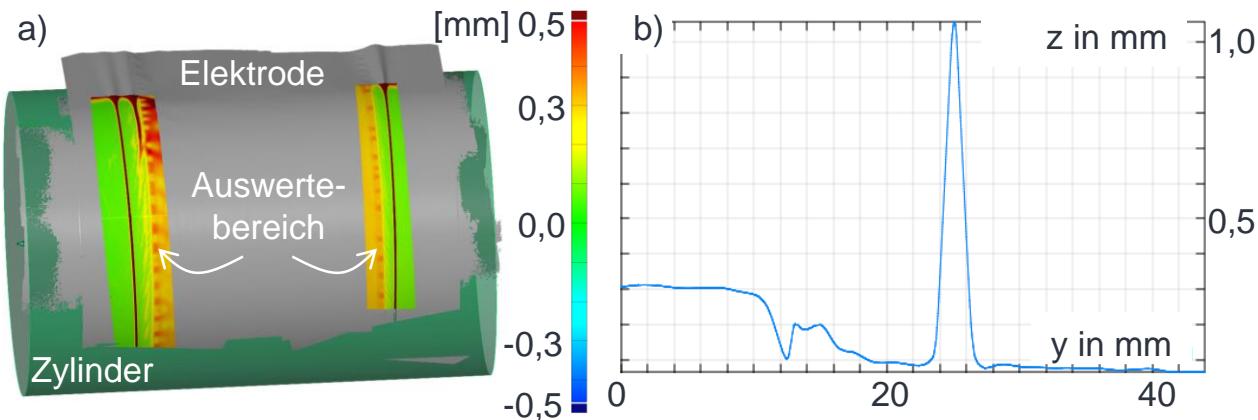


Abbildung 4-10 a) Elektrode mit Referenzzyliner und Auswertebereich, b) Profilschnitt im Auswertebereich

Die Datenaufnahme und Auswertung ist für den Lasersensor deutlich einfacher und schneller, als mit dem 3D-Scanner. Dennoch ist es sinnvoll, auch den 3D-Scanner zu verwenden, da die Bahn beim Kalandrieren häufig wandert und sich die Längsfalte somit nicht mehr im Messbereich der Laserlinie befindet. Der 3D-Scanner kann zudem die ganze Elektrode in einem Datensatz abbilden. Weiter bergen Reflexionen bei beiden Systemen eine große Herausforderung, da sie den Datensatz unbrauchbar machen können. Zuletzt reduziert die Verwendung beider Systeme die Abhängigkeit der Daten vom Messprinzip.

4.2.2 Datenverarbeitung

Der Ablauf der Datenverarbeitung und Berechnung der Geometrieeinformationen in MATLAB ist Abbildung 4-11 zu entnehmen. Da sich die Strukturen der CSV-Dateien aus der Lasermessung und dem 3D-Scan unterscheiden, gibt es zwei MATLAB-Programme, die sich im Kern gleichen. (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317)

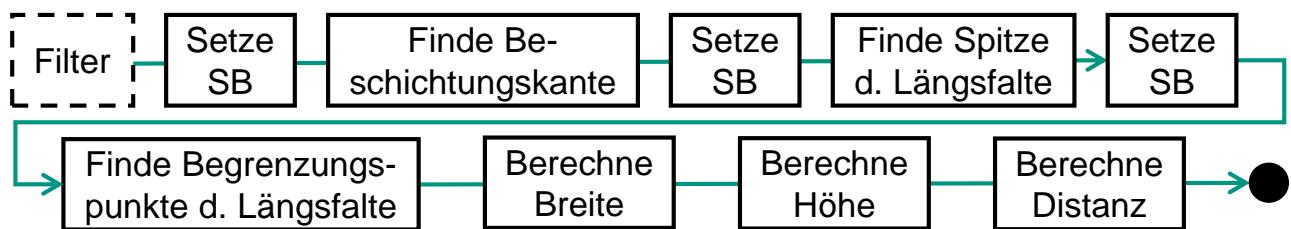


Abbildung 4-11 Ablauf des MATLAB-Programms zur Berechnung der Längsfaltengeometrie, (SB = Suchbereich) nach (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317)

Die Datenverarbeitung ist anspruchsvoll, Fehlerbilder wie die Folienverprägung (vgl. Abbildung 4-6) und Reflexionen stören das Finden der Bezugspunkte. Reflexionen

treten in den Profilen der Lasermessung in der Form von vertikalen Spitzen auf, wie in Abbildung 4-12a) zu erkennen ist. (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317)

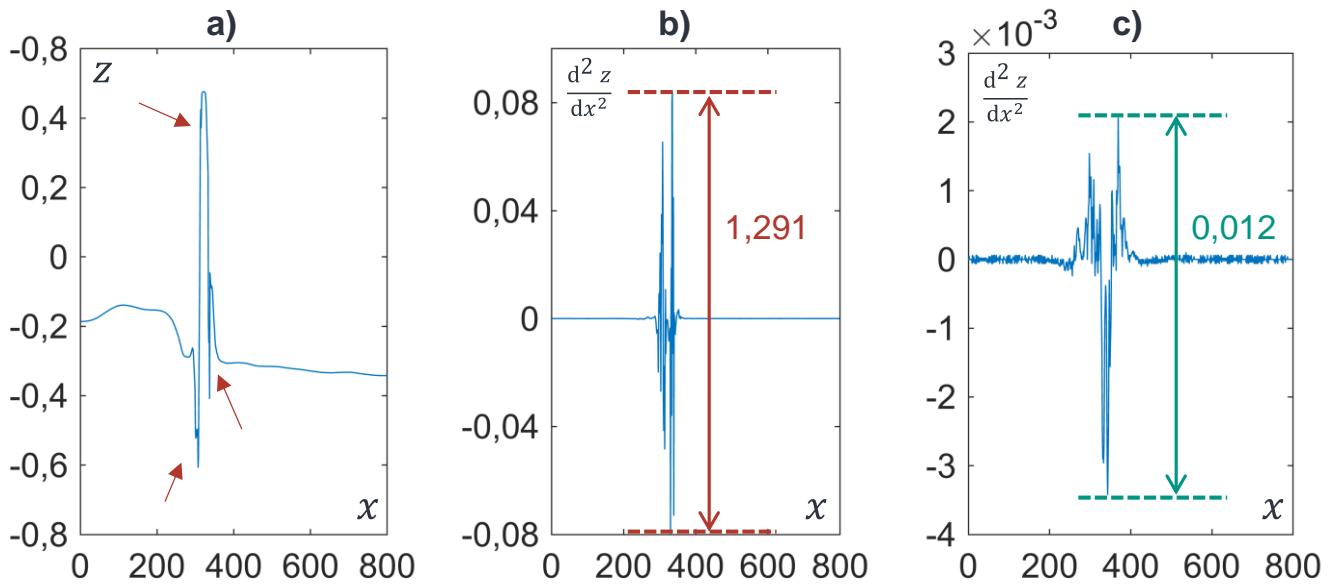


Abbildung 4-12 a) Profil aus einem Laserdatensatz mit Reflexionen (rote Pfeile), b) zweite Ableitung eines Profils aus einem Laserdatensatz mit Reflexionen c) zweite Ableitung eines fehlerfreien Datensatzes nach (A_Reusch 2023, S. 49,51)

Diese Profile werden durch einen Filter identifiziert und von der Berechnung ausgeschlossen. In den Profilen, die aus dem 3D-Scan generiert werden, erscheinen die Reflexionen als Datenlücken und können für den Export als CSV-Datei abgewählt werden. Eine Filterung ist somit nicht notwendig. Der selbst entwickelte Filter für die Laserdaten macht sich zunutze, dass die Steigungen der Reflexionen sehr viel höher sind als alle Steigungen, die in einem ungestörten Profil auftreten. Zunächst wird der Datensatz durch den MATLAB-eigenen „Moving Average Filter“ geglättet, um den Einfluss des Rauschens der Daten zu minimieren. Anschließend wird die zweite Ableitung des Profils gebildet und die Differenz des maximalen und minimalen Werts berechnet. In Abbildung 4-12b) ist diese Differenz für ein gestörtes Profil aufgetragen, während in c) ein ungestörtes Profil zum Vergleich zu sehen ist. Die Differenzwerte werden in einem Histogramm angezeigt, sodass die natürlichen Steigungen von den unnatürlichen Steigungen getrennt werden können und die gestörten Profile anhand des gewählten Schwellwerts aussortiert werden können. Die weitere Auswertung erfolgt dann mit den ungeglätteten Daten, um Verfälschungen des Datensatzes auszuschließen. (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317) Abbildung 4-13a) zeigt einen beispielhaften Datensatz vor der Filterung und in b) nach dem Ausschluss fehlerbehafteter Profile.

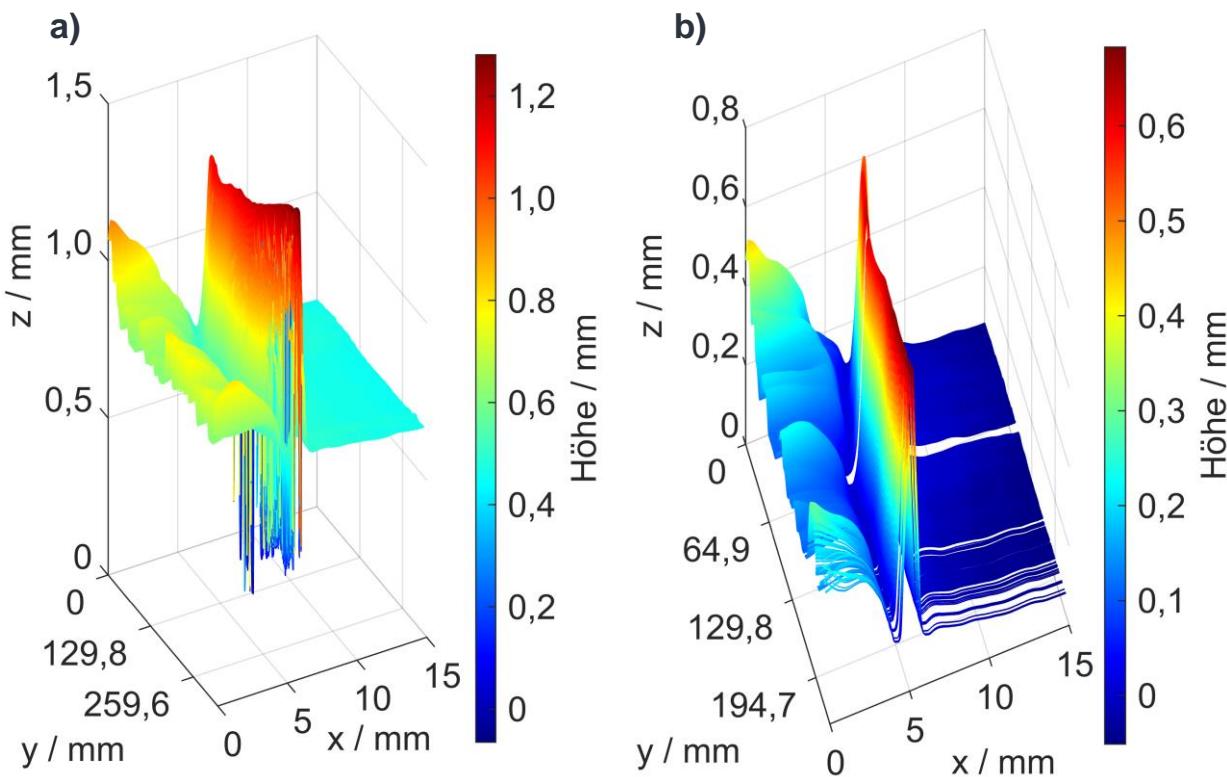


Abbildung 4-13 a) Datensatz mit Reflexionen, b) gefilterter Datensatz nach (A_Reusch 2023, S. 53)

Im Anschluss wird der allgemeine Suchbereich (SB) eingegrenzt, der eine stabile Längsfalte enthält. Dazu werden in der in Abbildung 4-14 dargestellten beispielhaften 2D-Ansicht des Datensatzes Bereiche oberhalb und unterhalb der stabilen Längsfalte ausgeschlossen. In diesem Beispiel wird, wie in Abbildung 4-14a) anhand der rechten Punkte zu erkennen, lediglich der unterste auslaufende Teil der Längsfalte ausgeschlossen. (A_Reusch 2023, S. 53–54; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317) Analog wird danach der Suchbereich für die Spitze festgelegt. Die definierten Punkte sind in Abbildung 4-14b) beispielhaft dargelegt. Entlang der gefundenen Gerade werden nun lokale Maxima gesucht, die den Spitzen der Längsfaltenprofile $P_{S,L}$ entsprechen. Diese sind in Abbildung 4-14b) schwarz gekennzeichnet. Anhand eines Beispielprofils wird der Suchbereich für die Begrenzungspunkte der Längsfaltenbreite $P_{B1,L}$ und $P_{B2,L}$ ausgewählt. Anschließend wird, ausgehend von den gefundenen Spitzen, in beiden Richtungen nach umliegenden lokalen Minima gesucht, die die Breite der Längsfalte eingrenzen. (A_Reusch 2023, S. 58–64; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317)

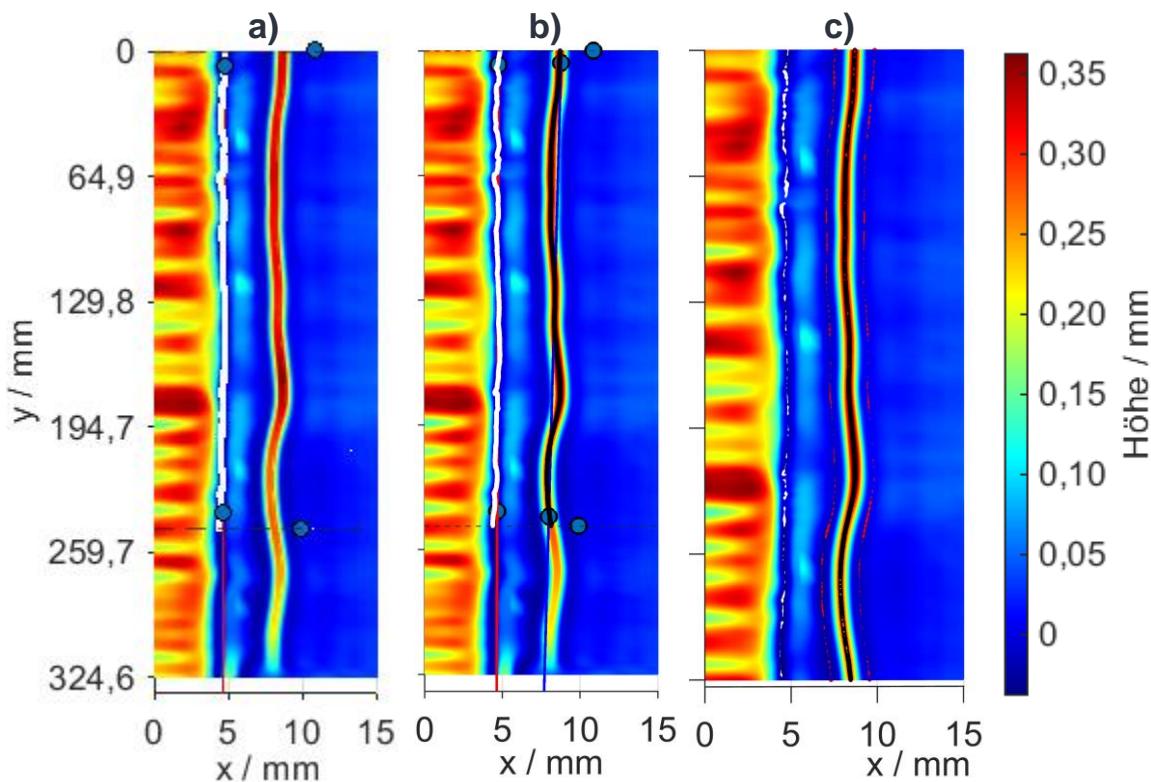


Abbildung 4-14 2D-Ansicht des Laserdatensatzes, Definition der a) Beschichtungskante, b) Spitze der Längsfalte, c) Begrenzungslinien nach (A_Reusch 2023, S. 56, 61, 69)

Mit den gefundenen Bezugspunkten werden nun anhand der in Kapitel 4.1.3 eingeführten Formeln die Höhe und Breite der Längsfalte sowie die Distanz zur Beschichtungskante für jedes Profil berechnet und gemittelt, sodass sich pro Datensatz ein Mittelwert für jeden Geometriewert ergibt. Längsfalten, die nicht exakt parallel zur Beschichtungskante verlaufen, zeigen daher erhöhte Standardabweichungen. Zuletzt werden die Geometriewerte aller Datensätze aus den Laserdaten und 3D-Scans gemittelt, sodass pro Versuch ein Mittelwert entsteht. (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317)

Abbildung 4-15 zeigt den verarbeiteten Laserdatensatz mit der Beschichtungskante in weiß, der Spitzenlinie in schwarz und den Begrenzungslinien in rot, wobei sich die Beschichtung auf der linken Seite befindet.

Die gezeigte Auswerteroutine in MATLAB wurde im Rahmen der angeleiteten Bachelorarbeit (A_Reusch 2023, S. 41–71) entwickelt und in (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Während der angeleiteten Bachelorarbeit (A_Seiraffi 2024, S. 35) fiel insbesondere für die Messung der Distanz bei HC_25_15_120 auf, dass die Distanz größer als die

Messlänge des Lasers war, weshalb häufig auf einen Messschieber zurückgegriffen werden musste.

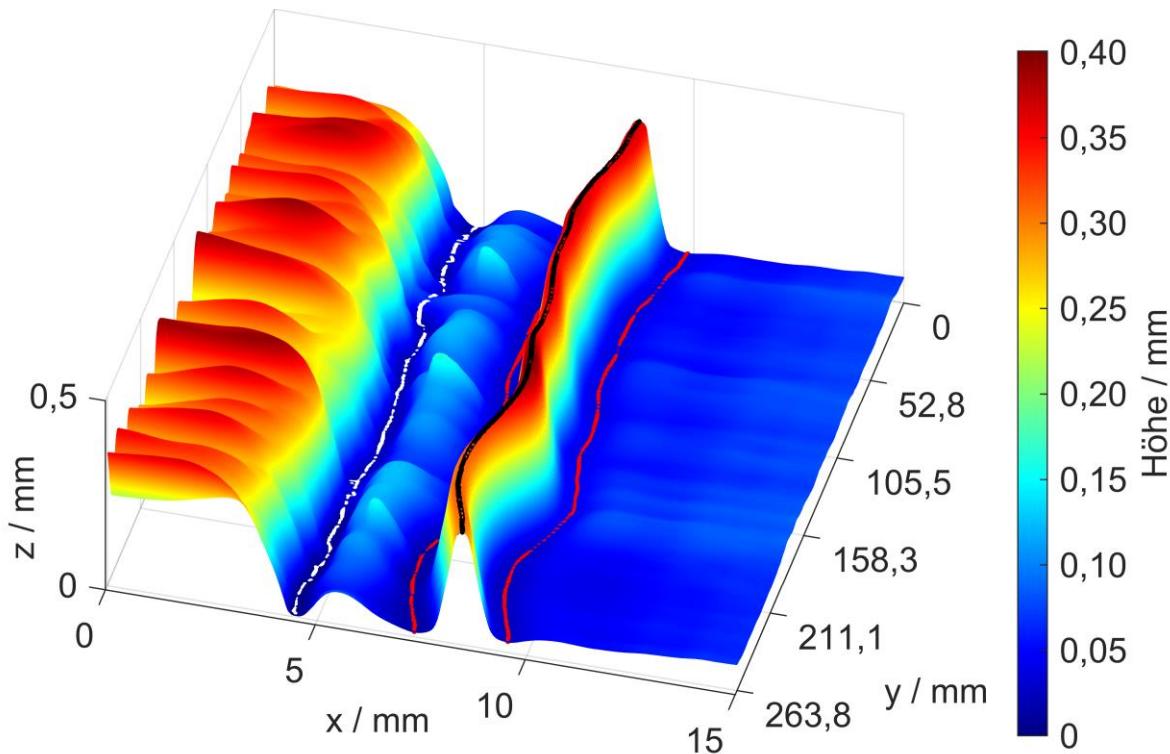


Abbildung 4-15 Ergebnis der Verarbeitung eines Laserdatensatzes nach (A_Reusch 2023, S. 69; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317)

4.2.3 Validierung

Im Folgenden wird die Funktionsfähigkeit der beschriebenen Vorgehensweise zur Charakterisierung der Längsfaltengeometrie gezeigt. Die Rohdaten wurden im Rahmen der angeleiteten Bachelorarbeit (A_Altmann 2022) gewonnen, aufbereitet und in (Wurba & Klemens et al. 2023) veröffentlicht.

Die Längsfaltenbildung in den NMC_30-Kathoden wird unter Verwendung des Lasers und des 3D-Scanners untersucht. Als Versuchsparameter werden der Bahnzug 110 N, Walzentemperatur 30 °C und zwei Dichtestufen verwendet. Abbildung 4-16 zeigt den Vergleich der Geometriewerte Höhe (h_L) und Breite (b_L) der Längsfalte sowie die Distanz zur Beschichtungskante (d_L), generiert anhand des jeweiligen Messsystems Laser oder 3D-Scanner bei den beiden Dichtestufen.

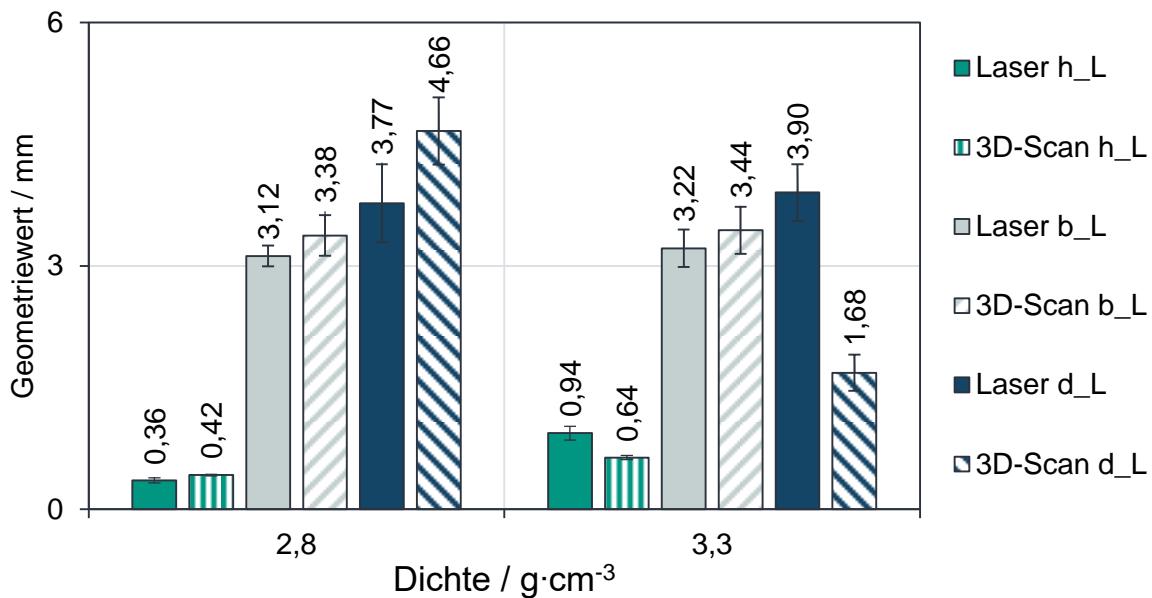


Abbildung 4-16 Vergleich der Geometriewerte für die Messungen mit dem Laser und dem 3D-Scanner nach (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 318)

Die Werte stimmen nicht exakt überein, liegen aber abgesehen von der Distanz nah beieinander. Weiter zeigen die Unterschiede keine Regelmäßigkeiten. Größere Abweichungen, wie sie bei der Distanz auftreten, sind insbesondere darauf zurückzuführen, dass beide Messsysteme nicht den exakt gleichen Abschnitt der Längsfalte erfassen, da der 3D-Scan nach der Lasermessung gestartet wird. Weiterhin können Fehlerbilder wie die Folienverprägung die Auswertung beeinträchtigen. Insgesamt kann die Datenaufnahme mit beiden Systemen als realistisch und vergleichbar eingestuft werden. (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 318)

Weitere Untersuchungen an HC-Anoden werden auf dem Kalander LDHY400-N45 bei Cidetec Energy Storage unter Verwendung des Lasersystems durchgeführt. Dabei wird gezeigt, dass die Vorgehensweise zur Charakterisierung der Längsfaltengeometrie mit dem Lasersystem für verschiedene Materialien und an verschiedenen Kalandern einsetzbar ist. Für Details wird auf (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 315–318) verwiesen.

4.3 Methodik zur Charakterisierung des Materialverhaltens der Elektroden

Im Folgenden werden die Messmethoden für die Charakterisierung der Materialeigenschaften erläutert.

4.3.1 Dehnungsmessung

Um einen Einblick in die Bewegung der Partikel durch das Kalandrieren zu erhalten, werden die Dehnungen an der Oberfläche der Elektroden analysiert. Dazu wird die Elektrode mit einem fein verteilten, unregelmäßigen, weißen Punktemuster eingesprühnt. Das unbeschichtete Substrat wird vorher schwarz grundiert, um Reflexionen zu vermindern. Abbildung 4-17a) zeigt den besprühten Abschnitt einer Elektrode. Das Muster wird vor dem Kalandrieren mithilfe des bereits in Kapitel 4.2.1 eingeführten optischen 3D-Scanners ATOS Core 135 (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH) aufgenommen (vgl. Abbildung 4-17b)). Die Aufzeichnung des Punktemusters vor dem Kalandrieren dient später als Referenzmessung. Weiter ist zu erkennen, dass das Messfeld nicht ausreicht, um das gesamte Punktemuster in der Breite zu erfassen. Daher werden zwei nebeneinanderliegende Aufnahmen angefertigt und durch Markierungen gekennzeichnet. Nach dem Kalandrieren werden die Aufnahmen der gekennzeichneten Felder erstellt. Durch das Kalandrieren verschieben sich die aufgesprühten Punkte auf der Oberfläche.

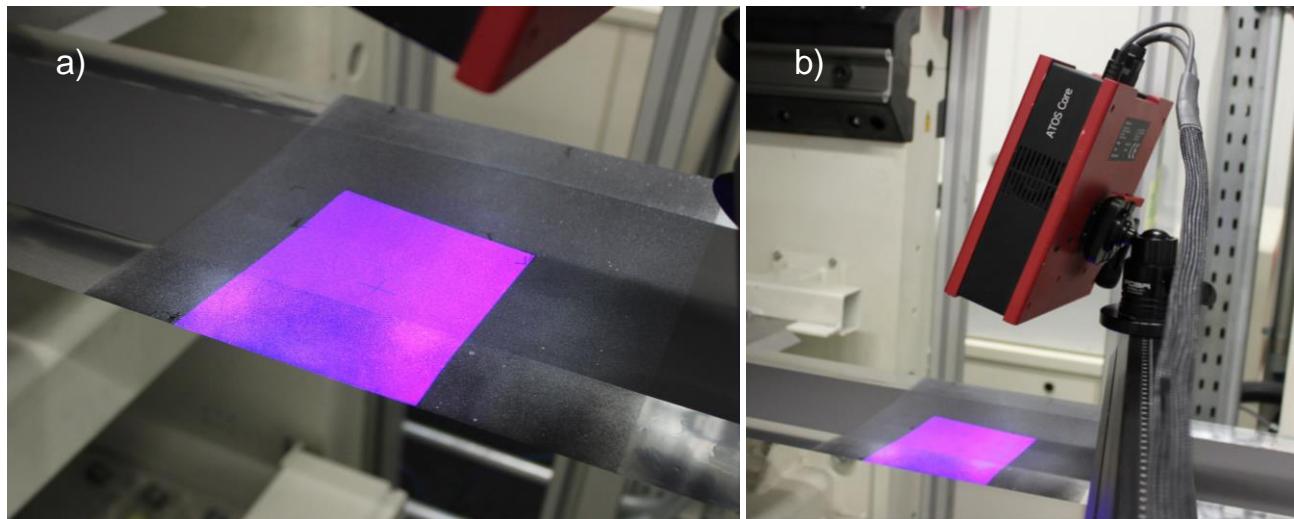


Abbildung 4-17 a) Messfeld auf der besprühten Elektrode, b) ATOS Core 135 bei der Aufnahme des Punktemusters vor dem Kalandrieren

Diese Verschiebungen werden mithilfe der zugehörigen Software GOM Correlate (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH) in Dehnungen umgerechnet. Abbildung 4-18 zeigt die Dehnungsanteile in x- und y-Richtung. Die Dehnung in x-Richtung, also quer zur Laufrichtung, wird im Folgenden als x-Dehnung ε_x bezeichnet. Analog gibt es die y-Dehnung ε_y in Laufrichtung.

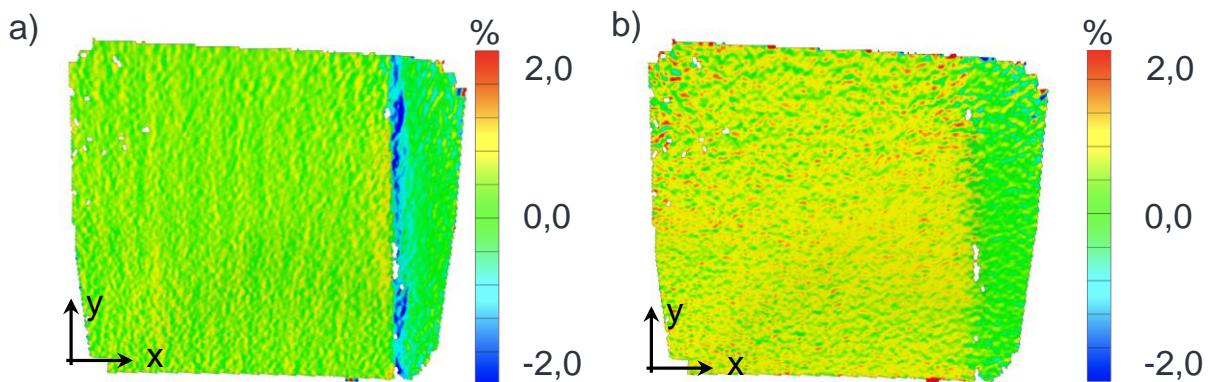


Abbildung 4-18 Exemplarische Darstellung der Dehnungen auf der Elektrodenoberfläche in der Software GOM Correlate a) x-Dehnung ε_x b) y-Dehnung ε_y

Für die Auswertung werden insgesamt über 50 Schnitte längs und quer zur Laufrichtung eingebracht, entlang derer die Dehnungsdaten als CSV-Datei exportiert werden. Die Daten werden nach x- und y-Dehnungen in MATLAB sortiert und gemittelt. Zuletzt werden die Dehnungen der Messungen auf beiden Seiten ebenfalls gemittelt und es ergeben sich die in den folgenden Kapiteln gezeigten Dehnungen für die kalandrierten Elektroden.

Die grundlegende Methodik zur Messung der Dehnung wurde im Rahmen der Dissertation von (Bold 2023, S. 88–90) bereits erarbeitet und auch in (Mayer & Wurba et al. 2021, S. 3) publiziert. Während der angeleiteten Abschlussarbeiten (A_Altmann 2022, S. 31,36-37; A_Goldschmidt 2023, S. 35-36,45-46; A_Reusch 2023, S. 27–30) wurde die hier beschriebene Methodik stetig erweitert und verbessert.

4.3.2 Deformationsmessung

Die Deformation der Elektrode prägt sich, wie bereits in Kapitel 2.4.6 beschrieben, einerseits in Form von Wellen und andererseits in Form von Ausbeulungen aus.

Die Welligkeit einer Elektrode wird in dieser Arbeit in die Amplitude a und die Wellenlänge λ untergliedert. Dabei wird die Amplitude a als Höhendifferenz zwischen dem z-Wert eines Maximums (z_{max}) und eines Minimums (z_{min}) beschrieben (vgl. Formel 4-4).

$$a = z_{max} - z_{min}$$

4-4

Die Wellenlänge λ ist definiert als Differenz zwischen den y-Werten zweier aufeinander folgenden Extrema ($y_{ex,w}, y_{ex,w+1}$).

$$\lambda = y_{ex,w} - y_{ex,w+1}, w \in \mathbb{Z}$$

4-5

Die Definition der Amplitude und Wellenlänge in einem Profil in y-Richtung ist in Abbildung 4-19 gezeigt.

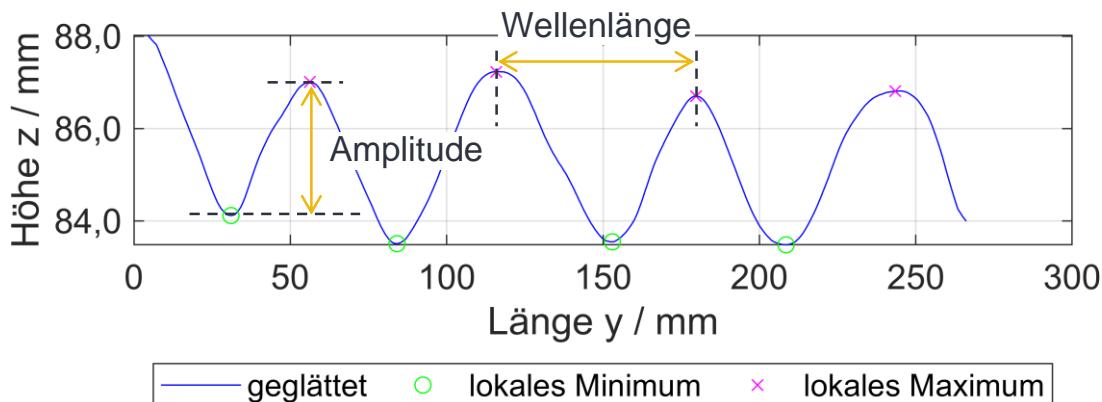


Abbildung 4-19 Definition der Amplitude und Wellenlänge anhand eines Profils in y-Richtung in Anlehnung an (A_Seiraffi 2024, S. 41)

Die Profile der Elektroden werden mithilfe des Lasers LJ-X8900 (Keyence Deutschland GmbH) aufgezeichnet. Dieser wird über der Bahn zwischen dem Glättwerk und dem Zugwerk mit einem Abstand zur Achse der ersten Umlenkrolle von 320 mm (Position 3 in Abbildung 4-2) positioniert. Während der Messung muss sich die Bahn also bewegen. Die Abtastrate beträgt 50 Hz. Analog zu der Datenaufnahme mit dem Laser für die Längsfaltenerfassung wird über die zugehörige Software eine CSV-Datei exportiert. Die Datenauswertung erfolgt in MATLAB. Auch bei der Aufnahme der Deformation treten häufig Reflexionen auf (vgl. Abbildung 4-20a)), sodass die auszuwertenden Bereiche zunächst selektiert werden müssen.

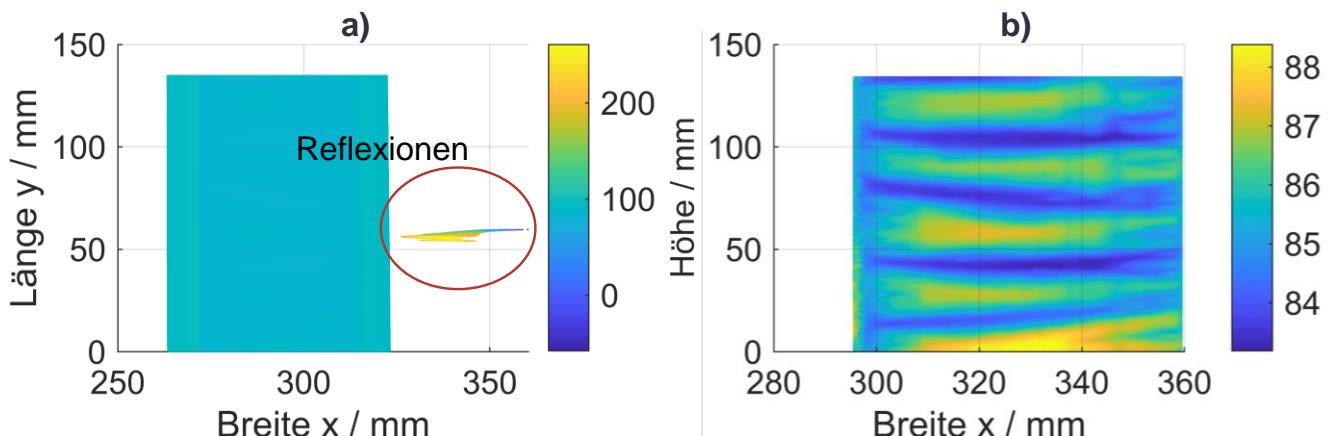


Abbildung 4-20 Datensatz in der Draufsicht a) Reflexionen vor der Auswahl, b) beschichteter Bereich nach der Auswahl nach (A_Seiraffi 2024, S. 45,47)

Das Ergebnis ist in Abbildung 4-20b) gezeigt, bei dem auch bereits die unbeschichteten Bereiche mit entfernt wurden, da lediglich der beschichtete Bereich von Interesse ist.

Der Einfluss von Fehlern im beschichteten Bereich kann durch die Definition von Grenzen in z-Richtung vermindert werden, wie in Abbildung 4-21 dargestellt ist.

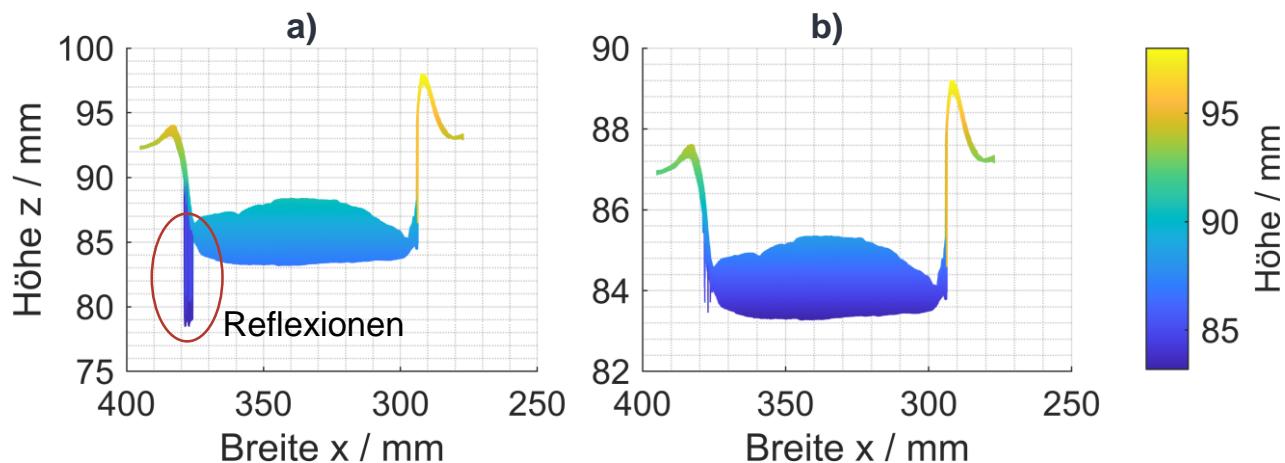


Abbildung 4-21 Auswahl des auszuwertenden Bereichs in der Frontansicht: a) mit Reflexionen vor der Auswahl, b) nach der Auswahl

Anschließend werden die Schnittachsen in Laufrichtung definiert (vgl. Abbildung 4-22) und entlang dieser ausgewertet.

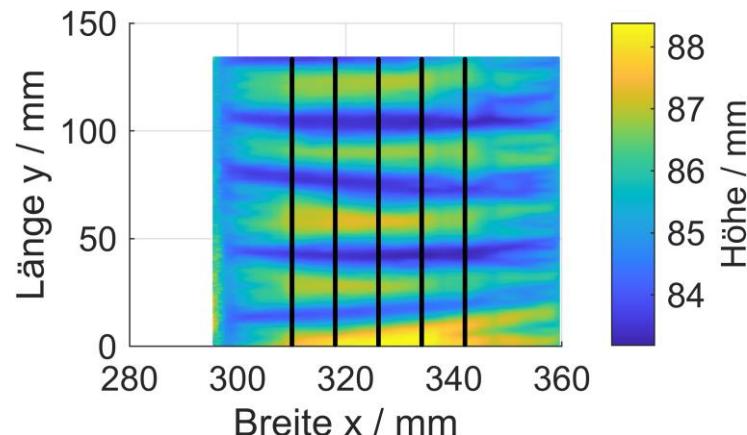


Abbildung 4-22 Definition der Schnitte in Laufrichtung nach (A_Seiraffi 2024, S. 47)

Da die Daten mit einem leichten Rauschen überlagert sind, müssen diese zunächst mithilfe des Moving Average Filters (MATLAB) geglättet werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 4-23 zu sehen.

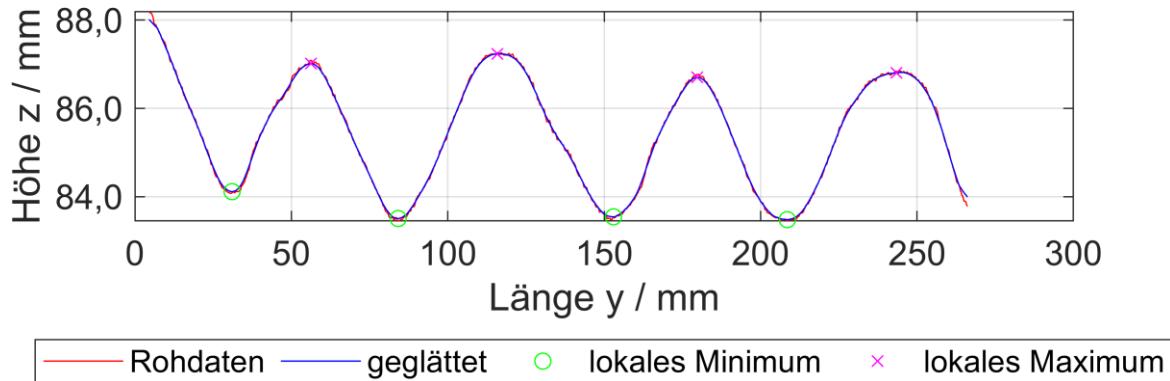


Abbildung 4-23 Exemplarische Profile geglättet (blau), unverarbeitet (rot), mit gefundenen Maxima und Minima nach (A_Seiraffi 2024, S. 48)

Viele der Wellenberge und -täler verlaufen mit Zwischenplateaus oder Spitzen, die fälschlicherweise als Maxima bzw. Minima erkannt werden. Um dies zu verhindern, müssen Erwartungswerte vorgegeben werden, innerhalb derer die Amplituden bzw. Wellenlängen liegen sollten. Datenpunkte, die außerhalb dieser Grenzwerte liegen, werden nicht berücksichtigt. Abbildung 4-24 zeigt deutlich, dass ohne Grenzwerte einige falsche Minima und Maxima gefunden werden, die in Abbildung 4-23 nicht zu sehen sind.

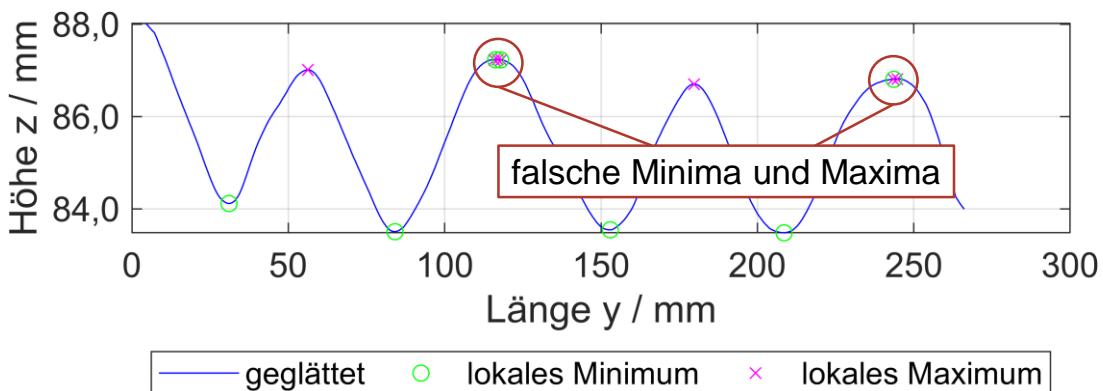


Abbildung 4-24 Erkannte Minima und Maxima ohne Erwartungswerte in Anlehnung an (A_Seiraffi 2024, S. 51)

Zur Validierung der gezeigten Auswerteroutine wird ein ausgewähltes Profil zunächst mithilfe der gezeigten MATLAB-Auswertung untersucht (vgl. Abbildung 4-25a)). Das gleiche Profil wird außerdem in der Software des Lasers LJ-X Observer (Keyence Deutschland GmbH) manuell nachgemessen. In der Schnittansicht in Abbildung 4-25b) sind jeweils eine beispielhafte Messung für eine Wellenlänge (gelb) und eine Amplitude (grün) zu sehen.

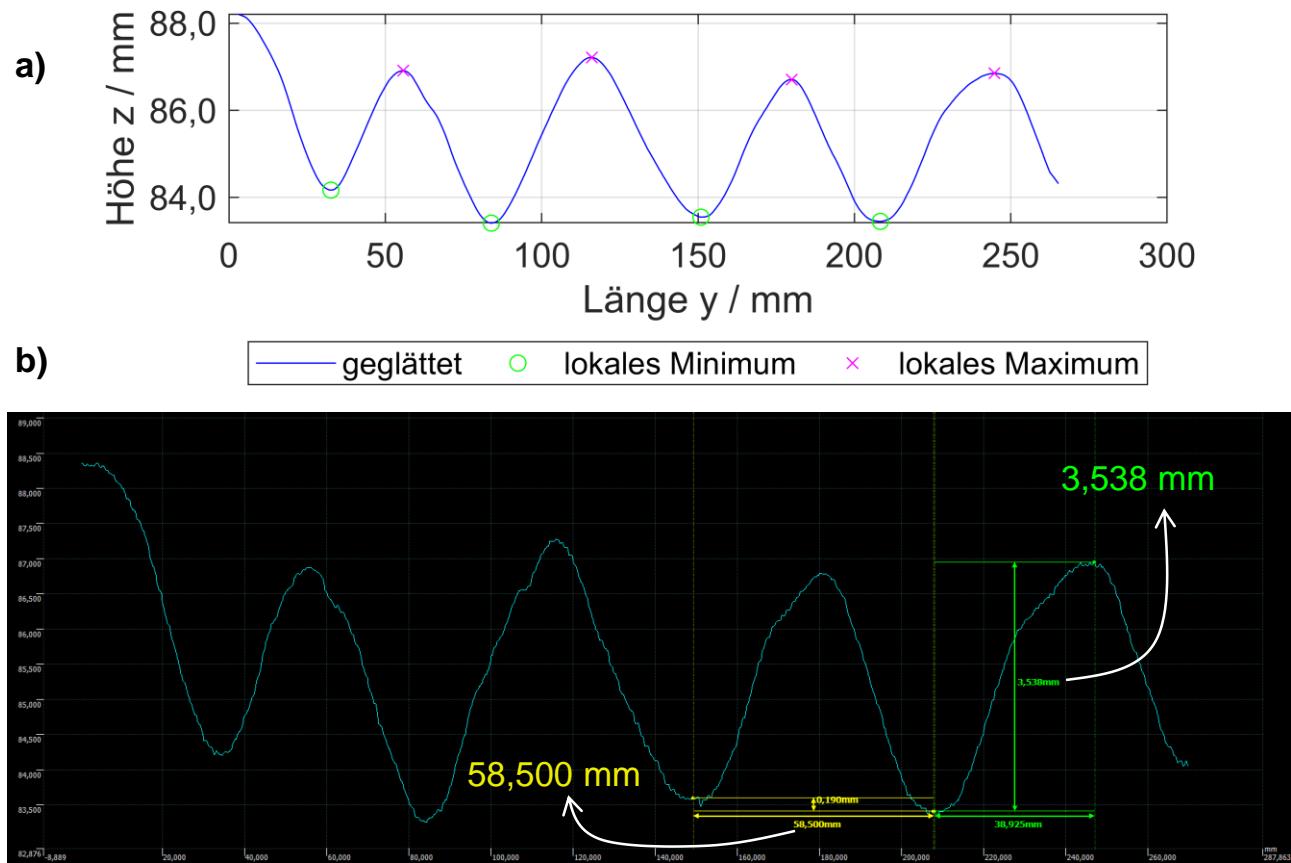


Abbildung 4-25 Vergleich der Messverfahren: a) MATLAB Auswertung, b) manuelle Auswertung in der Software LJX-Observer nach (A_Seiraffi 2024, S. 54)

Diese Messung wird für alle Amplituden und Wellenlängen des gezeigten Schnittbilds durchgeführt. So ergeben sich die in Tabelle 4-6 gezeigten Mittelwerte für die Wellenlänge und Amplitude des Schnitts. Zum Vergleich sind die Mittelwerte aus der MATLAB-Auswertung dargestellt. Die Abweichungen liegen dabei für die Amplitude bei 1,85 % und für die Wellenlänge bei 0,11 %. Somit kann die Auswertung in MATLAB als valide betrachtet werden.

Tabelle 4-6 Vergleich der Wellenlängen und Amplituden für die beiden Messverfahren in Anlehnung an (A_Seiraffi 2024, S. 78)

Auswertemethodik	Amplitude / mm	Wellenlänge / mm	Betragsmäßige Abweichung / %
MATLAB	3,296	57,890	1,85
LJX-Observer	3,357	57,825	0,11

Insbesondere für die HC-Anoden treten nicht in allen Fällen Wellen auf. Stattdessen beult sich die Elektrode nach oben oder unten aus, wie in Abbildung 4-26a) sichtbar ist.

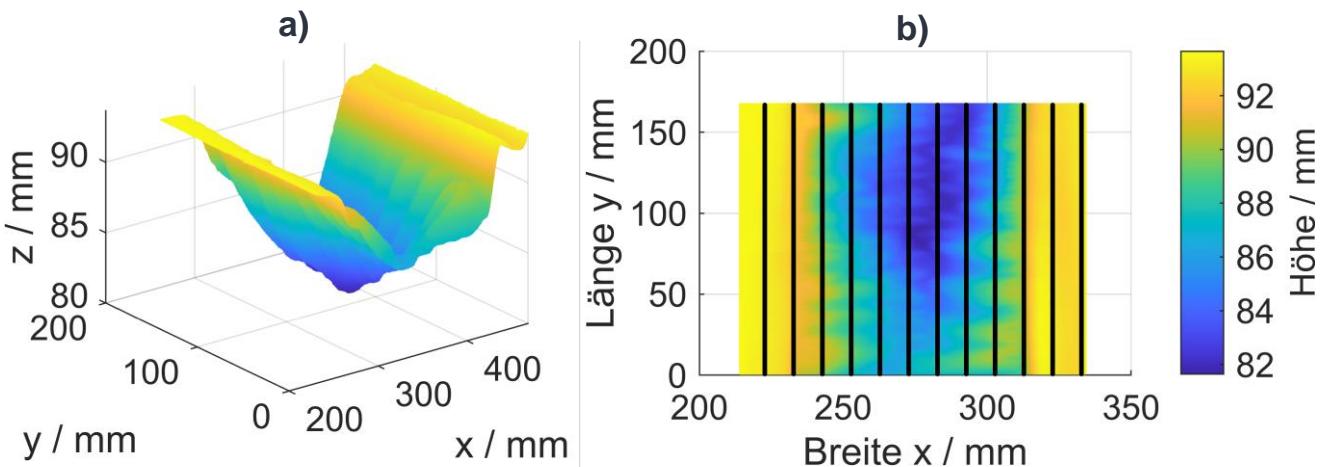


Abbildung 4-26 a) 3D-Ansicht einer ausgebeulten Elektrode, b) Lage der Schnitte

Daher werden in diesen Fällen die maximalen Höhendifferenzen ΔZ_{Max} als Deformation herangezogen (vgl. Formel 4-6). Dazu werden Schnitte über die gesamte Breite der Bahn gelegt und das globale Maximum $z_{max,global}$ und das globale Minimum $z_{min,global}$ ausgelesen (vgl. Abbildung 4-26b)). Für die maximale Höhendifferenz ΔZ_{Max} ergibt sich also

$$\Delta Z_{Max} = z_{max,global} - z_{min,global} .$$

4-6

Die Basis für die hier gezeigte Methodik wurde im Rahmen der angeleiteten Bachelorarbeiten (A_Altermann 2022, S. 32-33, 41-42; A_Reusch 2023, S. 30–33) erarbeitet und innerhalb von (A_Seiraffi 2024, S. 40–54) finalisiert.

4.3.3 Biegeversuche

Mithilfe von Zweipunktbiegeversuchen wird die breitenbezogene Biegsteifigkeit der Elektroden ermittelt. Die Messeinrichtung besteht aus einer zwicki RetroLine Universalprüfmaschine und dem zugehörigen Zweipunktbiegeprüfmodul für Papier und Pappe (ZwickRoell GmbH & Co. KG) in Anlehnung an (ISO 5628 2019, S. 4). Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-27 schematisch dargestellt.

Die Elektroden werden in Streifen der Breite $b_{Probe} = 15 \text{ mm}$ zugeschnitten und in die Aufnahme eingespannt. In Abhängigkeit der Länge können mehrere Prüfungen auf einem Streifen durchgeführt werden, indem die Probe nach der Prüfung nach unten verschoben wird. Die Elektrode berührt den Kraftaufnehmer, der mit der Kraftmessdose verbunden ist. Der Abstand zwischen der Einspannung und dem Kraftaufnehmer beträgt 5 mm und wird als Messlänge l_{Biege} bezeichnet. Für die Durchführung des

Versuchs bewegt sich die Traverse mit einer Prüfgeschwindigkeit von $0,17 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ nach unten. Dabei wird die translatorische Bewegung in eine Drehbewegung der Aufnahmeverrichtung umgewandelt. Eine Prüfung beschreibt eine Drehung um einen Biegeinkel $\beta = 0^\circ \dots 90^\circ$. Durch die Drehung der Einspannung wird die Elektrode gebogen und gegen den Kraftaufnehmer gedrückt. Das Ergebnis der Prüfung ist eine Korrelation zwischen Biegekraft F_{Biege} und Durchbiegung f , die in Abbildung 4-27 beispielhaft abgebildet ist.

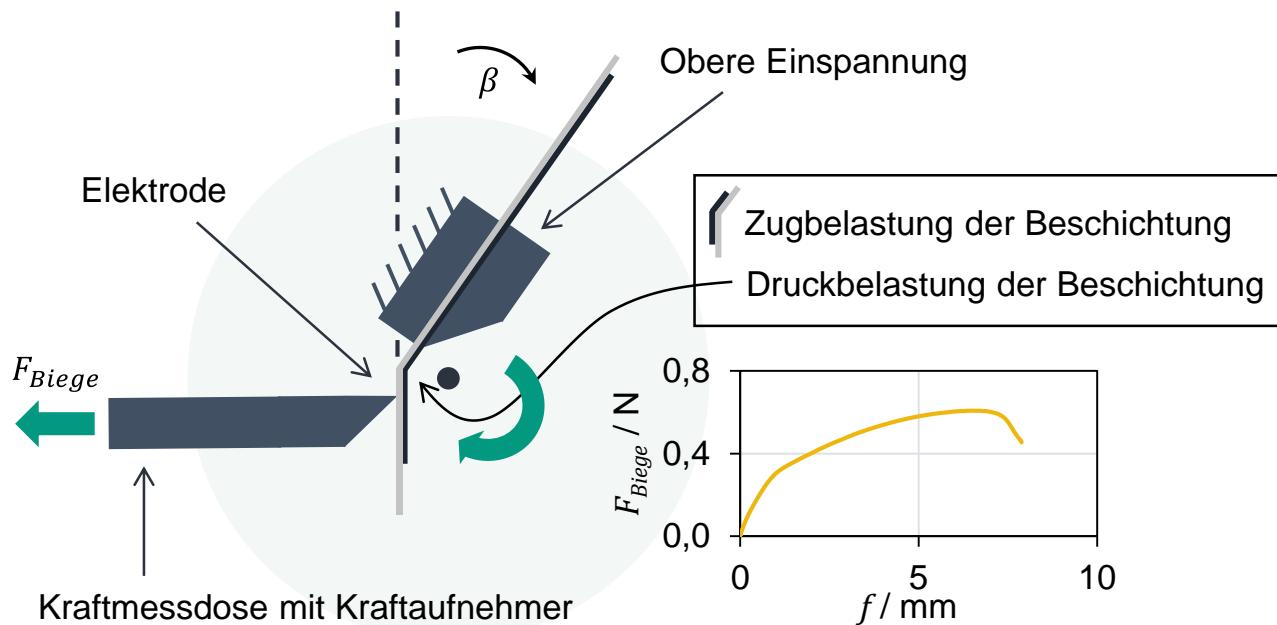


Abbildung 4-27 Schematischer Aufbau der Zweipunktbiegeprüfung an Elektroden in Anlehnung an (A_Altmann 2022, S. 44; Klemens & Wurba et al. 2023, S. 12)

Anhand von Formel 4-7 kann dann die breitenbezogene Biegesteifigkeit S berechnet werden (ISO 5628 2019, S. 5).

$$S = \frac{F_{Biege}}{f} \cdot \frac{l_{Biege}^3}{3b_{Probe}} \quad 4-7$$

Der Quotient $\frac{F_{Biege}}{f}$ ist in der zur Prüfmaschine gehörenden Prüfsoftware testXpert III (ZwickRoell GmbH & Co. KG) als die Steigung der E-Modul-Geraden E' definiert. Der Quotient aus Biegekraft und Durchbiegung wird also im Bereich der geraden Kraft-Durchbiegungskurve berechnet, wie in Formel 4-8 beschrieben. Die Grenzen des Auswerteintervalls werden dabei zwischen den oberen und unteren Durchbiegungswerten f_o und f_u beschrieben. Die entsprechenden oberen und unteren Kraftwerte sind $F_{Biege,o}$ und $F_{Biege,u}$.

$$\frac{F_{Biege}}{f} = E' = \frac{F_{Biege,o} - F_{Biege,u}}{f_o - f_u} \quad 4-8$$

(Klemens & Wurba et al. 2023, S. 12–13)

Abbildung 4-27 zeigt weiterhin die beiden Einspannmöglichkeiten für einseitig beschichtete Elektroden, die zu einer Zug- bzw. Druckbelastung der Beschichtung im Biegebereich führen (Gupta & Üçel et al. 2020, S. 851).

4.3.4 Abschälversuche

Die Adhäsion zwischen der Beschichtung der Elektrode und dem Substrat wird mithilfe des 90°-Schälversuchs gemessen. Dieser wird ebenfalls an der zwicki RetroLine Prüfmaschine durchgeführt und orientiert sich an der DIN EN 28510-1 „90°-Schälversuch“ (DIN EN 28510-1 2014) und der Testmethode FTM2 „Peel adhesion (90°) at 300 mm per minute“ (FINAT). Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 4-28 dargestellt.

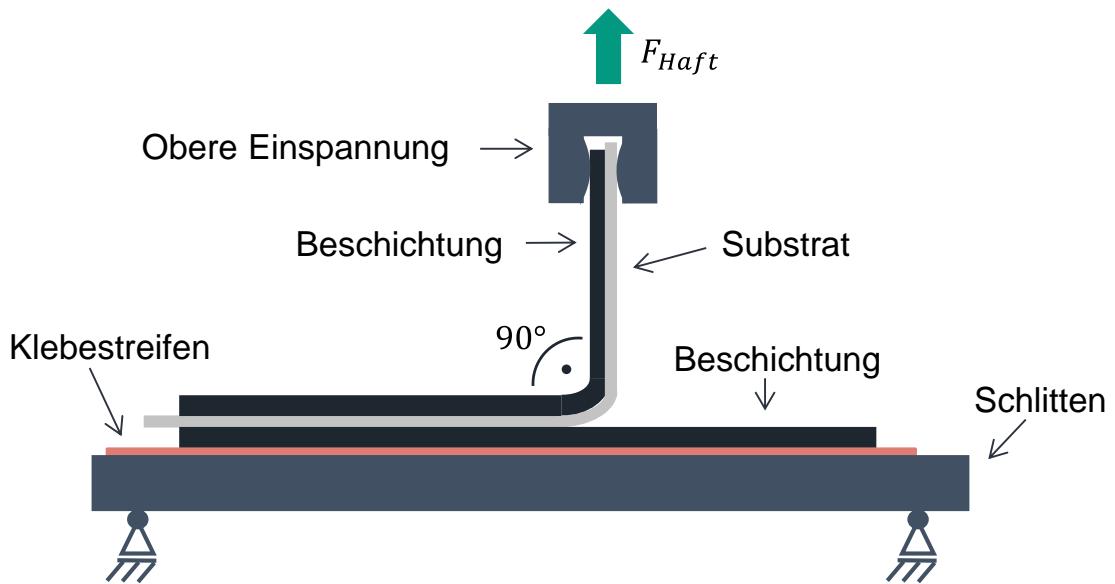


Abbildung 4-28 Schematische Darstellung des 90°-Schälversuchs

Die Elektrode wird auf einem horizontal verschiebbaren Schlitten mithilfe eines doppelseitigen Klebebands fixiert. Dabei muss ein freies Ende bestehen bleiben, welches im 90 ° - Winkel eingespannt wird. Die Traverse der Prüfmaschine verfährt mit der Prüfgeschwindigkeit $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ nach oben. Die aufgeklebte Beschichtung haftet an dem Klebestreifen, während sich der übrige Teil der Elektrode senkrecht ausrichtet. Die untere Beschichtung wird also vom Substrat abgeschält. Der 90 ° - Winkel wird dabei

durch das Verfahren des Schlittens nach rechts konstant gehalten. Während des Abschälvorgangs wird die benötigte Kraft aufgezeichnet und anschließend über den Messbereich gemittelt. Die gemessene Kraft wird als Haftkraft F_{Haft} bezeichnet und für die Auswertung durch die Probenbreite 15 mm geteilt. Es ergibt sich die breitenbezogene Haftkraft F_H . Zur Beurteilung der Adhäsion werden mindestens fünf Proben getestet.

Die Durchführung der 90°-Schälversuche wurde bereits durch (Bold 2023, S. 64–65) beschrieben. Im Rahmen der angeleiteten Abschlussarbeiten (A_Altmann 2022, S. 42–44; A_Goldschmidt 2023, S. 44–45; A_Seiraffi 2024, S. 33–34) wurde die hier beschriebene Methodik stetig erweitert und verbessert.

4.3.5 Reibversuche

Zur Bewertung des Reibkontakte zwischen der Elektrode und der Umlenkrolle sowie zwischen den Kontaktflächen des in Kapitel 7 diskutierten Fingergreifers werden Reibversuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau orientiert sich an der (*DIN EN ISO 8295 2004*) und ist in Abbildung 4-29 schematisch gezeigt. Die Trägerplatte ist fest fixiert. Der Schlitten ist über ein Seil, welches über eine Umlenkrolle geführt wird, mit der Traverse verbunden. Im Versuch verfährt die Traverse mit einer Prüfgeschwindigkeit von 100 mm·min⁻¹ nach oben und der Schlitten wird über die Trägerplatte gezogen. Der Reibkontakt kann beliebig über die Wahl der beiden Reibflächen eingestellt werden. Über die Traverse wird die benötigte Reibkraft F_R aufgezeichnet. Mithilfe der Normalkraft F_N wird analog zu Formel 4-9 der Reibungskoeffizient μ berechnet. Die senkrecht wirkende Normalkraft entspricht dabei der Gewichtskraft, wobei die Masse des Schlittens 192 g beträgt.

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad 4-9$$

Der Reibungskoeffizient wird in den statischen und dynamischen bzw. Haft- und Gleitreibungskoeffizienten unterteilt. Der statische Reibungskoeffizient μ_s beschreibt die Reibung, die zu Beginn eines Gleitvorgangs auftritt. Dazu muss ein gewisser Kraftschwellwert überschritten werden, bevor das Gleiten einsetzen kann. Der Gleitvorgang bei konstanter Geschwindigkeit wird durch den dynamischen Reibungskoeffizienten μ_d charakterisiert. (*DIN EN ISO 8295 2004*, S. 4–5)

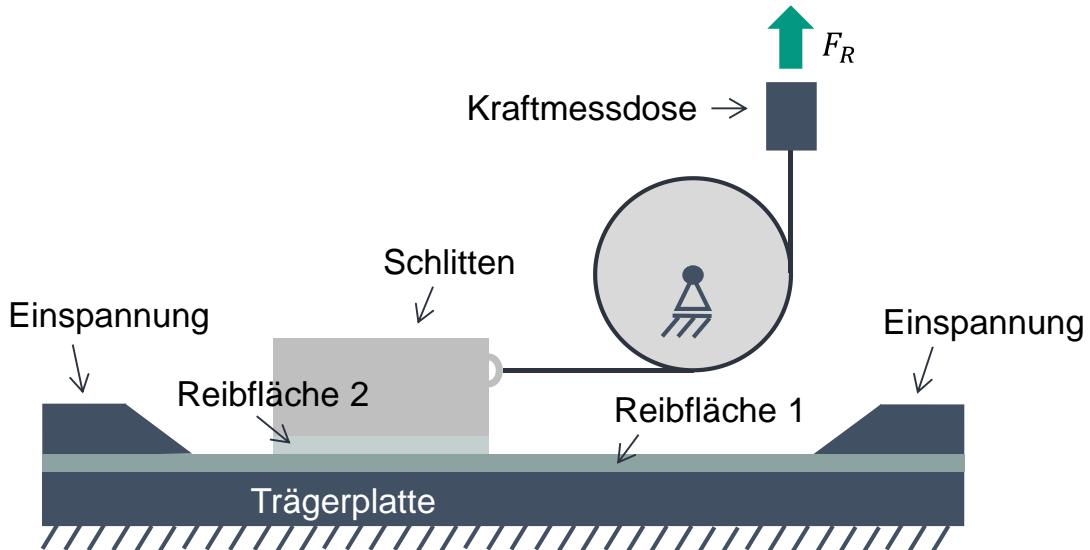


Abbildung 4-29 Schematischer Aufbau des Reibversuchs in Anlehnung an (DIN EN ISO 8295 2004)

4.4 Versuchsplanung und statistische Auswertung

Im Folgenden werden die Versuchsplanung für die LIB-Kathoden sowie die dazugehörige Auswertung erläutert. Weiter wird das Versuchsdesign für die HC-Anoden vorgestellt.

4.4.1 Versuchsplanung für die Untersuchung der LIB-Kathoden

Die Versuchspläne wurden mithilfe der Software Minitab® (Minitab, LLC) im Rahmen der angeleiteten Abschlussarbeiten (A_Altmann 2022; A_Goldschmidt 2023) aufgestellt und in (Wurba & Altmann et al. 2024; Wurba & Goldschmidt et al. 2024) veröffentlicht. Aus Tabelle 4-2 wird ersichtlich, dass die einstellbaren Prozessparameter im Wesentlichen die Bahnzüge, die Walzentemperatur, die resultierende Linienlast und die Bahngeschwindigkeit umfassen. Als zu untersuchende Faktoren werden die Dichte der Beschichtung ρ_B , der Bahnzug am Zugwerk F_B und die Walzentemperatur T_W gewählt. Die Dichte der Beschichtung korreliert positiv mit der benötigten Linienlast (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 500). Dabei ist diese Beziehung, wie in (Bold 2023, S. 107; Meyer & Bockholt et al. 2017, S. 174) gezeigt wird, nicht linear und auch von der verwendeten Anlage und dem Material abhängig. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wird daher auf die Dichte der Beschichtung als Prozessparameter zurückgegriffen. Für die Längsfaltenbildung ist aus Sicht des Bahnzugs lediglich der Abschnitt zwischen dem Kalanderwalzenpaar und dem Zugwerk relevant, da sich hier die Materialeigenschaften der Elektrode ändern und sich erst hier die Längsfalten infolge der Verdichtung

ausbilden. Das Kalanderwalzenpaar wirkt zudem wie eine Zugunterbrechung zum Abwickler, der daher aus der Betrachtung ausgeschlossen werden kann. Der Bahnzug am Aufwickler wird ebenfalls nicht variiert, da das Zugwerk eine Bahnzugunterbrechung darstellt und die Längsfalte an der ersten Umlenkrolle des Zugwerks entsteht. Der Bahnzug nach dem Zugwerk hat also für die Längsfaltenbildung keine Relevanz. Im Folgenden wird der Bahnzug am Zugwerk daher vereinfachend als Bahnzug bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird überwiegend lediglich von der „Temperatur“ gesprochen, dennoch ist stets die Walzentemperatur T_W gemeint. Alle Versuche werden mit einer Bahngeschwindigkeit von $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ durchgeführt, um den Materialkonsum durch den Prozess und den Versuchsraum gering zu halten.

4.4.1.1 NMC_50 und LFP_50

Für die Untersuchungen wird ein flächenzentrierter Versuchsplan (engl. Face Centered Central-Composite-Design) gewählt, da die Anzahl der Versuchsdurchläufe vertretbar schnell mit der Anzahl der Faktoren ansteigt und dies im Allgemeinen ein oft eingesetzter Versuchsplan ist (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 42). Wie in Abbildung 4-30 dargestellt, enthält dieser acht Eckpunkte, sechs Achsenpunkte und einen Zentralpunkt, der zweimal angefahren wird. Somit ergeben sich 16 Versuche, die in Tabelle 4-7 dargestellt sind. Die Versuche werden für beide Kathoden gleichermaßen durchgeführt. Die Bezeichnung der Einzelversuche ergibt sich aus der Versuchsnummer und der Elektrodenbezeichnung, also beispielsweise 1_NMC_50 für die Versuchsnummer 1 und die Elektrode NMC_50. Der Bahnzug am Abwickler beträgt 60 N und am Aufwickler 30 N, um Bahnrisse zu vermeiden.

Tabelle 4-7 Flächenzentrierter Versuchsplan für NMC_50 und LFP_50 (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 498)

Nr.	ρ_B	F_B	T_W	Nr.	ρ_B	F_B	T_W
1	0	0	0	9	-1	-1	+1
2	0	0	-1	10	+1	-1	+1
3	-1	-1	-1	11	+1	+1	+1
4	+1	-1	-1	12	-1	+1	+1
5	+1	+1	-1	13	-1	0	0
6	-1	+1	-1	14	+1	0	0
7	0	-1	0	15	0	+1	0
8	0	0	+1	16	0	0	0

Die Codierung der Faktorstufen ist in Tabelle 4-8 aufgelöst. LFP_50 konnte nicht auf die gleiche Dichte wie NMC_50 kalandriert werden. Aufgrund der Reibung zwischen den Partikeln und der Binder-Leitruß-Matrix kann die Partikelgrößenverteilung für einen unterschiedlichen Verdichtungswiderstand verantwortlich sein (Meyer & Kosfeld et al. 2018). Die REM-Aufnahmen in Abbildung 4-3 bestätigen eine unterschiedliche Partikelgrößenverteilung. Aus Tabelle 4-3 geht außerdem hervor, dass die Dichte bereits im unkalandrierten Zustand geringer ist. Ein Vergleich der Verdichtung Π ergibt für NMC_50 34,09 % und für LFP_50 32,56 %. Somit sind die Versuchsergebnisse dennoch vergleichbar.

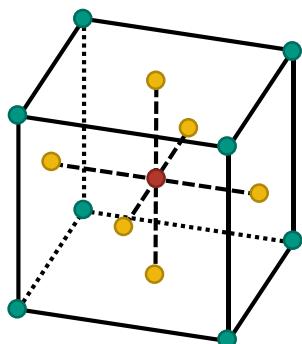


Tabelle 4-8 Codierte Faktorstufen für NMC_50 und LFP_50

Faktorstufe	$\rho_{B,NMC}$ / g·cm ⁻³	$\rho_{B,LFP}$ / g·cm ⁻³	F_B / N	T_W / °C
-1	2,80	1,98	80	30
0	3,05	2,11	95	60
+1	3,30	2,23	110	90

Abbildung 4-30 Flächenzentrierter Versuchsplan nach (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 42)

(A_Goldschmidt 2023, S. 32–34; Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 2)

4.4.1.2 NMC_30

Für diese Versuche wird ein vollfaktorieller Versuchsplan mit zwei Faktorstufen gewählt, der in Tabelle 4-9 zu sehen ist. Der Versuchsplan enthält lediglich die Eckpunkte, die auch bereits in Abbildung 4-30 in grün dargestellt sind. Diese sind ausreichend, da für die Geometrie der Längsfalten keine quadratischen Effekte festgestellt wurden.

Tabelle 4-9 Vollfaktorieller Versuchsplan für NMC_30 nach (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 499)

Nr.	ρ_B	F_B	T_W	Nr.	ρ_B	F_B	T_W
1	+1	-1	-1	5	-1	+1	+1
2	-1	+1	-1	6	+1	+1	-1
3	-1	-1	+1	7	-1	-1	-1
4	+1	+1	+1	8	+1	-1	+1

Analog wird auch hier die Bezeichnung der Einzelversuche anhand der Versuchsnummer und der Elektrodenbezeichnung eingeführt. Die Codierung der Faktorstufen ist bereits in Tabelle 4-8 enthalten. Der Bahnzug an Auf- und Abwickler wurde zu jeweils 60 N eingestellt. (A_Altmann 2022, S. 28; Wurba & Altmann et al. 2024, S. 498–499)

4.4.2 Statistische Auswertung der Untersuchung der LIB-Kathoden

Für die Regression zwischen den Prozessparametern und den Geometrieinformationen der Längsfalten wird das zweiseitige Konfidenzintervall zu 90 % bestimmt, da andernfalls kein Modell für die Bewertung gebildet werden kann. Dies entspricht dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,1$. Das Regressionsmodell für die Prozessparameter und die Materialeigenschaften wird mithilfe des Signifikanzniveaus $\alpha = 0,05$ gebildet. Alle Regressionsmodelle basieren auf der Rückwärtselimination von Minitab. (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 499; Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 2) Dabei werden die Modellterme, für deren Wahrscheinlichkeitswert $p > \alpha$ gilt, iterativ entfernt (Grima Cintas 2012, S. 254–255). Der p -Wert ist als die statistische Irrtumswahrscheinlichkeit, einen Effekt als wahr anzunehmen, definiert (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 75).

Für die Bewertung der Ergebnisse in den folgenden Kapiteln werden die p -Werte der signifikanten Faktoren sowie adaptierte Haupteffekt-Diagramme herangezogen. Als Haupteffekt (HE) eines Faktors wird die Differenz der Mittelwerte der jeweiligen Stufen bezeichnet. Die Versuchsergebnisse werden in Effekt-Diagrammen anhand der Faktoren gruppiert. Die Mittelwerte der Faktorstufen werden über eine Linie miteinander verbunden, wobei die Steigung die Stärke eines Effekts andeutet. (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 13–14) Signifikante Faktoren sind in den in dieser Arbeit gezeigten HE-Diagrammen durch die jeweilige Regressionslinie gekennzeichnet. Wechselwirkungen (WW) beschreiben Effekte eines Faktors, die von anderen Faktoren abhängig sind (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 15). Auf die Darstellung von WW-Diagrammen wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Signifikante zweifache WW und quadratische Effekte (QE) werden an entsprechender Stelle unter Zuhilfenahme der p -Werte diskutiert. Dreifach-WW treten nicht auf.

Die Abhängigkeit zwischen den Materialeigenschaften und den Geometrieinformationen wird mithilfe des Pearson-Korrelationskoeffizienten r bewertet. Dieser beschreibt die Stärke einer linearen Beziehung und es gilt $r \in [-1,1]$. $r = 0$ definiert, dass keine lineare Korrelation besteht. $|r| = 1$ entspricht demnach einer perfekten linearen Korrelation, wobei das Vorzeichen die Richtung der linearen Abhängigkeit anzeigt. Die

Signifikanz einer solchen Korrelation wird ebenfalls durch den p -Wert angegeben. (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 381–382)

4.4.3 Versuchsplanung für die Untersuchung der HC-Anoden

Aufgrund der geringen Materialverfügbarkeit kann lediglich der Einfluss der Dichte in zwei Stufen untersucht werden. Der Bahnzug wird auf $F_B = 110 \text{ N}$ eingestellt, während die Walzentemperatur $T_W = 30^\circ\text{C}$ beträgt. Für eine einfachere Vergleichbarkeit wird die Anode HC_25_15_155 innerhalb der HC-Anoden als Referenzelektrode definiert.

Aus Tabelle 4-5 gehen die gewählten Dichtestufen für die Anoden hervor. Dabei wird ersichtlich, dass für die ersten beiden Anoden (HC_20_15_155 und HC_25_15_155) andere Dichten kalandriert wurden als für die letzten beiden Anoden (HC_25_12_155 und HC_25_15_120), obwohl die gleichen Ausgangsmaterialien und Herstellungsprozesse verwendet wurden.

Tabelle 4-10 Versuchsplan für die HC-Anoden

Bezeichnung	Dichte / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	
	+1	-1
HC_20_15_155	1,08	1,02
HC_25_15_155	1,08	1,03
HC_25_12_155	0,89	0,86
HC_25_15_120	0,89	0,86

Laut Cidetec Energy Storage kamen zwei Chargen des HC-Pulvers zum Einsatz, wobei die zweite Charge eine etwas geringere Partikelgröße zeigte. Die Prozessierung der Partikel erwies sich als herausfordernd und es kam zu vermehrter Agglomeratbildung. (Boyno 2024; Leonet 2024) Aus den REM-Aufnahmen in Abbildung 4-4 gehen keine signifikanten Unterschiede der Schichten hervor. Abbildung 4-31 bestätigt, dass es bei der Produktion der Anoden zu Problemen kam. Die Elektroden scheinen nicht vollständig trocken aufgewickelt worden zu sein und es finden sich zahlreiche Agglomerate, die zur Streifenbildung führten. Zelltests zeigten außerdem, dass die Elektroden der zweiten Charge Einbußen hinsichtlich der spezifischen Kapazität mit sich brachten. Leider ließ sich nicht mehr zuordnen, welche Elektroden mit welchen Anteilen aus welchen Chargen hergestellt wurden. (Leonet 2024)

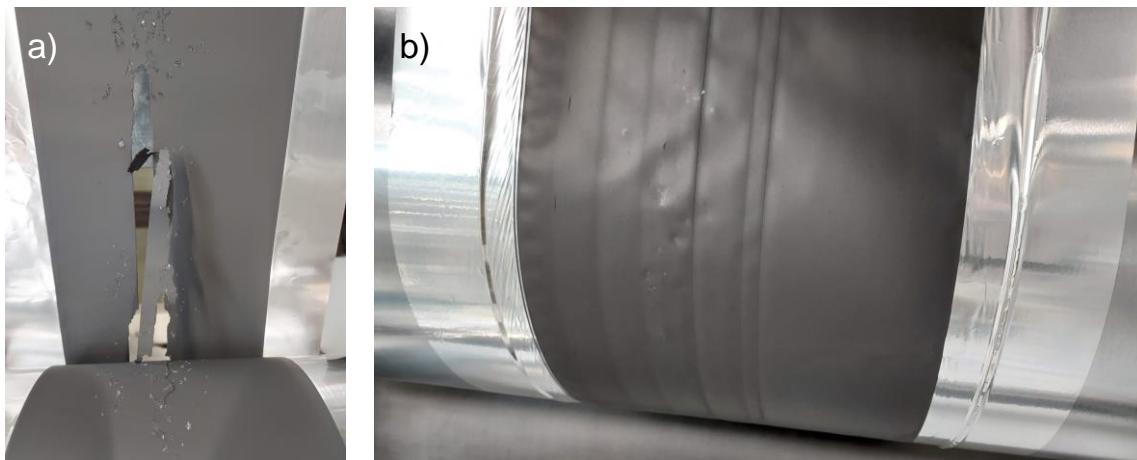


Abbildung 4-31 Beschichtungsfehler in HC_25_15_155: a) unkalandriert mit klebender Schicht, b) kalandrierte Beschichtungsfehler

Abbildung 4-32 zeigt die kalandrierten Beschichtungsdicken. Wie aufgrund der unterschiedlichen Flächenbeladungen (vgl. Tabelle 4-3) zu erwarten ist, liegt die kalandrierte Beschichtungsdicke von HC_20_15_155 unter denen der anderen Anoden. HC_25_12_155 und HC_25_15_120 haben ähnliche kalandrierte Dicken, was den Erwartungen entspricht, da das Ausgangsflächengewicht bei beiden Anoden nahezu gleich ist. HC_25_15_155 zeigt wider Erwarten eine niedrigere kalandrierte Beschichtungsdicke, obwohl hier das Ausgangsflächengewicht größer war. Allerdings war auch die Ausgangsbeschichtungsdicke geringer. Die Linienlasten sind für HC_25_12_155 und HC_25_15_120 ähnlich. Für die anderen beiden Anoden ist die Differenz aus hoher und niedriger Linienlast geringer. Weiter wurden die Anoden mit dem höheren Flächengewicht deutlich nach der Anode mit dem niedrigeren Flächengewicht kalandriert. Dabei wurden die Anoden an der normalen Umgebungsluft gelagert, was möglicherweise auch einen Effekt auf das Kalandrierverhalten haben kann. Dies kann nachträglich jedoch nicht mehr untersucht werden.

Abbildung 4-32 zeigt dennoch, dass die Verdichtungen trotzdem ähnlich sind, abgesehen von der Anode HC_20_15_155, deren Werte deutlich höher liegen. Für HC_20_15_155 wurde ein weiterer Versuch mit der Dichte $0,98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ durchgeführt, der keine Längsfalten hervorbrachte. Dieser Versuch ist daher nicht mit aufgeführt. Dies zeigt, dass eine gewisse Mindestdichte erforderlich ist, um Längsfalten zu erzeugen.

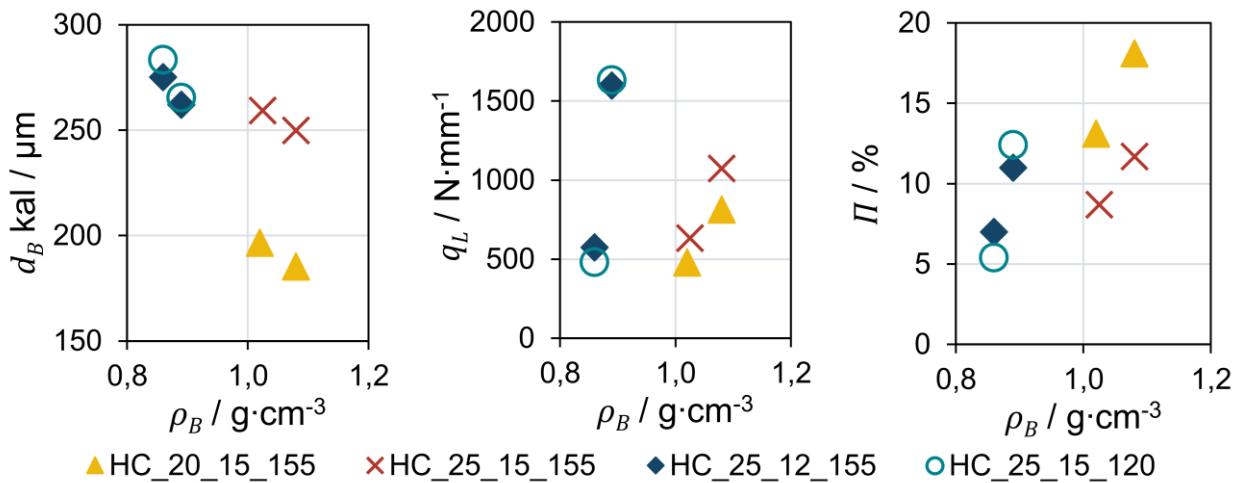


Abbildung 4-32 Beschichtungsdicken d_B nach dem Kalandrieren, Linienlasten q_L und Verdichtung Π in Abhängigkeit der Dichte

Aufgrund der geringen Datenmenge ist eine statistische Datenauswertung analog zur Auswertung für die LIB-Kathoden nicht sinnvoll, weshalb die Ergebnisse lediglich anhand der HE-Diagramme diskutiert werden.

5 Einfluss der Material- und Prozessparameter auf die Längsfaltenbildung bei Kathoden für LIB

Im folgenden Kapitel wird zunächst der Einfluss der Prozessparameter auf die Materialeigenschaften untersucht. Anschließend werden die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und der Geometrie der Längsfalte diskutiert. Darauf aufbauend werden die Materialgrößen mit der Längsfaltengeometrie korreliert und der Einfluss des Formats der Elektrode wird erläutert.

Die Rohdaten, die zu den in diesem Kapitel dargestellten Erkenntnissen führen, wurden in den angeleiteten Abschlussarbeiten (A_Altmann 2022; A_Goldschmidt 2023) erzeugt. Die aufbereiteten Daten sind teilweise in (Wurba & Altmann et al. 2024; Wurba & Goldschmidt et al. 2024; Wurba & Klemens et al. 2023) enthalten und werden in diesem Kapitel weiterverwendet.

5.1 Einfluss der Prozessparameter auf das Materialverhalten der Elektroden

Die folgenden Unterkapitel beschreiben den Einfluss der drei Faktoren Dichte ρ_B , Bahnzug F_B und Walzentemperatur T_W auf das Materialverhalten. Dazu werden die Dehnung, Deformation, Biegesteifigkeit und die Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat untersucht. Diese Größen werden im Folgenden vereinfacht als Materialeigenschaften bezeichnet.

5.1.1 Dehnung

Die folgenden Ergebnisse sind aus (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3–4) entnommen und nochmals aufbereitet. Abbildung 5-1 zeigt einen Vergleich der Dehnungen in x-Richtung (quer zur Laufrichtung) und y-Richtung (in Laufrichtung) zwischen LFP_50 und NMC_50. Die dargestellten Werte entsprechen den jeweiligen Mittelwerten aus allen Versuchen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Dehnungen an der Oberfläche für beide Elektroden gleich ausfallen. Im Vergleich zu den HC-Anoden ähneln sich die LFP- und NMC811-Beschichtungen in ihrer Zusammensetzung, Partikelgrößenverteilung, Aktivpartikelmorphologie und dem initialen Flächengewicht, was die sehr ähnlichen Werte erklären kann. Dabei sind die y-Dehnungen deutlich größer als die x-Dehnungen. Durch den Walzvorgang in y-Richtung wird die Beschichtung in y-Richtung eingezogen

und die Partikel somit in y-Richtung verschoben, was zu den stärkeren y-Dehnungen führt. Die Verdichtung der Beschichtung während des Kalandrierens sorgt außerdem für eine Verschiebung der Aktivmaterialpartikel in alle Richtungen (Sangrós Giménez & Finke et al. 2019, S. 8). Die x-Dehnung resultiert daher aus Verschiebungen der Partikel in x-Richtung und somit Eigenspannungen.

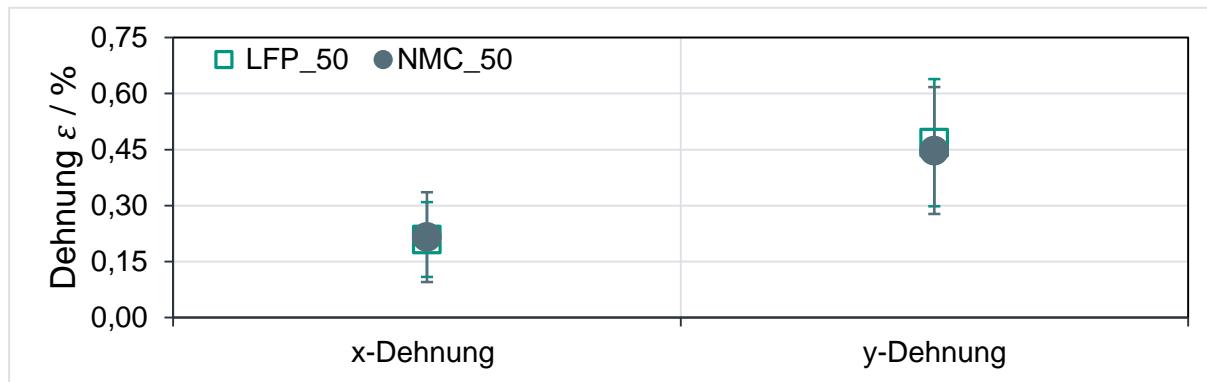


Abbildung 5-1 Vergleich der Mittelwerte der Dehnungen für LFP_50 und NMC_50

Die Abhängigkeit des Dehnungsverhaltens von den drei Faktoren Dichte ρ_B , Bahnzug F_B und Walzentemperatur T_W ist jeweils in Abbildung 5-2 für die x-Dehnung ε_x und in Abbildung 5-3 für die y-Dehnung ε_y in den HE-Diagrammen abgebildet.

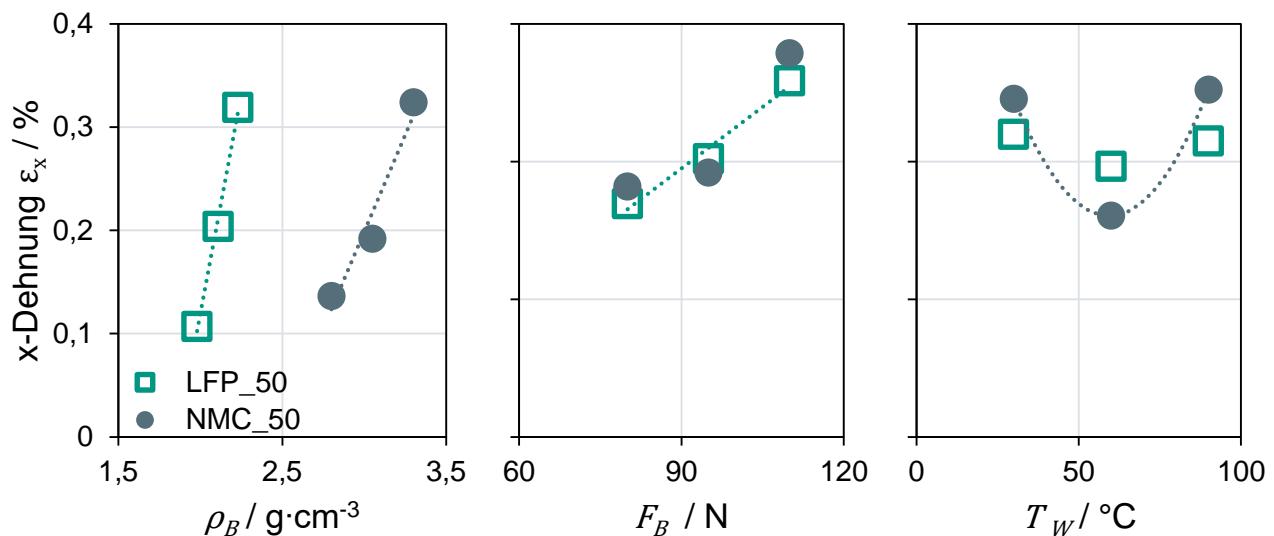


Abbildung 5-2 HE-Diagramm für die x-Dehnung ε_x für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 4)

Dabei sind die signifikanten HE sowie der signifikante quadratische Effekt der Temperatur durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Auch aus den HE-Diagrammen geht hervor, dass alle Dehnungswerte für NMC_50 und LFP_50 im gleichen Wertebereich

liegen. Außerdem passen die Mittelwerte der Dehnungen für NMC_50 zu den Dehnungswerten des NMC_30 aus (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 500). Die Dehnungsmessungen sind daher als reproduzierbar anzusehen.

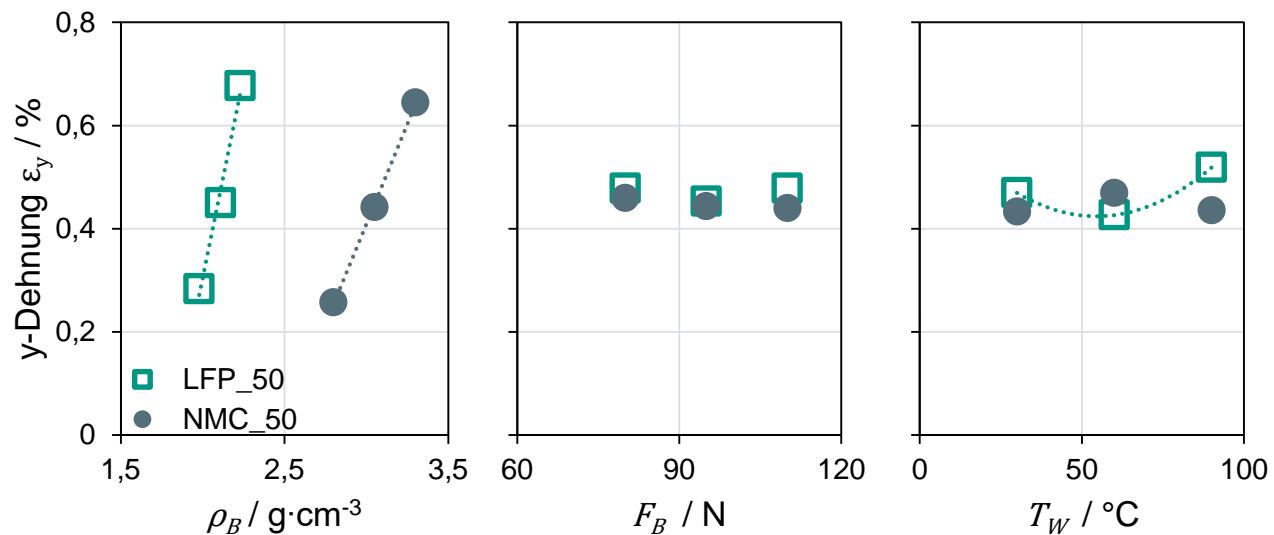


Abbildung 5-3 HE-Diagramm für die y -Dehnung ε_y für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 4)

Alle signifikanten HE, WW und QE sind in Tabelle 5-1 als p -Werte dargestellt, für die $p \leq \alpha$ mit $\alpha = 0,05$ gilt. Für alle anderen p -Werte, die in dieser Tabelle zur besseren Lesbarkeit nicht aufgeführt sind, gilt entsprechend $p > \alpha$ mit $\alpha = 0,05$. Dieses Vorgehen wird auch für alle folgenden Tabellen signifikanter p -Werte angewendet.

Tabelle 5-1 p -Werte signifikanter HE, WW und QE für die x - und y -Dehnung (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3)

Effekt	Faktor	x-Dehnung ε_x		y-Dehnung ε_y	
		NMC_50	LFP_50	NMC_50	LFP_50
HE	ρ_B	2,5E-03	1,5493E-06	1,7681E-07	9,6689E-09
	F_B	-	0,0109	-	-
	T_W	-	-	-	-
WW	$F_B \cdot \rho_B$	0,0240	0,0234	-	-
QE	$T_W \cdot \rho_B$	0,0441	-	-	0,0096

Für beide Kathoden hat die Dichte einen starken signifikanten positiven Einfluss auf die x- und y-Dehnungen, was auch in (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 500) gefunden wird. Die Verdichtung von NMC111-Kathoden mit größeren und kleineren Partikeln zeigt, dass sich die Partikel in der Kathode mit den größeren Partikeln umstrukturieren und

heterogen ohne Vorzugsrichtung bewegen. Die Partikel der Kathode mit den kleineren Partikeln bewegen sich aufgrund der stabileren Mikrostruktur gleichmäßiger in ihrer Vorzugsrichtung. (Lu & Daemi et al. 2020, S. 2751–2753) Diese Partikelbewegung zeigt sich anhand des Vergleichs des kalandrierten und des unkalandrierten Zustands in den REM-Aufnahmen in Abbildung 4-3. Je größer die erzielte Dichte der Beschichtung ist, desto größer sind diese Partikelbewegungen und die induzierten Dehnungen. Darüber hinaus hat der Bahnzug, wie in Tabelle 5-1 zu sehen ist, für LFP_50 einen signifikanten positiven Einfluss auf die x-Dehnung. Für NMC_50 ist ebenfalls ein positiver Effekt auf die x-Dehnung zu beobachten, der jedoch für $\alpha = 0,05$ nicht signifikant ist. Für beide Kathoden zeigt der Versuch Nr. 11 mit allen drei Faktoren auf der Stufe +1 eine unerwartet hohe x-Dehnung. Dies könnte die überraschend starke positive Beziehung zwischen der x-Dehnung und dem Bahnzug im Falle des LFP_50 erklären. In (Mayer & Wurba et al. 2021, S. 10) werden NMC811-Kathoden mit den Bahnzügen 1 N und 80 N auf eine hohe und niedrige Dichte kalandriert, wobei keine eindeutige Tendenz hinsichtlich des Einflusses des Bahnzugs auf die x-Dehnung festgestellt werden kann. Dies spricht auch für einen Einfluss des unerwartet hohen Messwerts für die maximale Stufe. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass das Prozessfenster hinsichtlich des Bahnzugs nicht dem hier untersuchten Prozessfenster entspricht.

Wie bereits in 2.4.3 erläutert, wird lediglich die Beschichtung beansprucht. Außerdem bildet sich ein Beschichtungsrückstau vor dem Kalanderspalt und die unbeschichteten Substratränder eilen dem beschichteten Teil voraus. Anhand der Folienverprägung lässt sich zeigen, dass dieser Effekt durch den Bahnzug verstärkt wird. (Bold 2023, S. 43-44, 111) Es ist daher denkbar, dass der aufgestaute Teil der Beschichtung durch den hohen Bahnzug an der Substratkante nach außen gezogen wird, was bei sehr hohen Bahnzügen zu Dehnungen in x-Richtung führen könnte. Der Einfluss der Temperatur auf die x-Dehnung von NMC_50 ist quadratisch, wobei der untere Scheitelpunkt der Parabel bei der mittleren Temperatur von $T = 60^\circ\text{C}$ liegt. Dieser Verlauf könnte durch die unerwartet hohe x-Dehnung von Versuch Nr. 11 hervorgerufen werden. Auch in (Bold 2023, S. 110) kann kein Einfluss der Temperatur auf die Dehnung beobachtet werden, was die Annahme einer Überanpassung des Modells der x-Dehnung unterstützt. Zu dieser Überlegung passt auch, dass die Temperatur für LFP_50 keinen signifikanten Einfluss auf die x-Dehnung aufweist. Für beide Kathodenmaterialien werden signifikante Zweifach-WW zwischen den Faktoren Bahnzug und Dichte mit den x-Dehnungen beobachtet. Im Falle des LFP_50 nimmt die x-Dehnung bei steigendem

Bahnzug mit zunehmender Dichte zu und folgt somit wie erwartet den HE. Bei NMC_50 nimmt die x-Dehnung mit steigendem Bahnzug sowie hoher und mittlerer Dichte zu, während sie bei niedriger Dichte und zunehmendem Bahnzug abnimmt. Anhand der gezeigten Untersuchungen kann dieser Effekt nicht eindeutig erklärt werden, da das Materialverhalten sehr komplex ist. Hinsichtlich der y-Dehnungen kann für den Bahnzug bei beiden Kathoden keine signifikante Auswirkung gezeigt werden. Da sich der beschichtete Teil der Elektrode längt und in Form einer Welle aus der Ebene heraushebt, liegt der Hauptteil des Bahnzugs am unveränderten, unbeschichteten Substratrand an. Daher hat der Bahnzug nahezu keinen Einfluss auf die y-Dehnung, wohl aber, wie bereits beschrieben, auf die x-Dehnung. Für LFP_50 wird neben dem Einfluss der Dichte auch ein quadratischer Einfluss der Temperatur mit dem unteren Scheitelpunkt der Parabel bei der mittleren Temperatur beobachtet. Dies könnte analog zur x-Dehnung für NMC_50 auf die unerwartet hohen y-Dehnungen der Versuche 5_NMC_50 und 11_NMC_50 zurückzuführen sein. Diese entsprechen der hohen Dichte und dem hohen Bahnzug, während die Temperatur jeweils auf der niedrigen bzw. hohen Stufe ist. So wird die Parabelform betont.

(Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3–4)

5.1.2 Deformation

Abbildung 5-4 zeigt die Mittelwerte der Amplituden und Wellenlängen der Einzelversuche. Die mittleren Amplituden unterscheiden sich kaum. Die mittlere Wellenlänge von LFP_50 scheint größer zu sein, jedoch muss diese Erkenntnis aufgrund der hohen Standardabweichung relativiert werden.

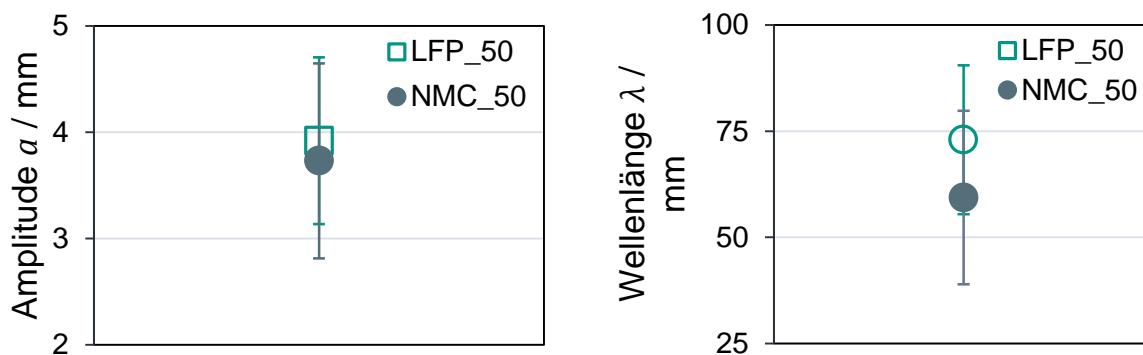


Abbildung 5-4 Vergleich der Mittelwerte der a) Amplitude a und b) Wellenlänge λ für LFP_50 und NMC_50

In beiden Kathoden ist anhand von Abbildung 5-5 und Tabelle 5-2 ein signifikanter positiver Zusammenhang der Amplitude zur Dichte zu erkennen, der auch in (Günther 2023, S. 120) gefunden wird.

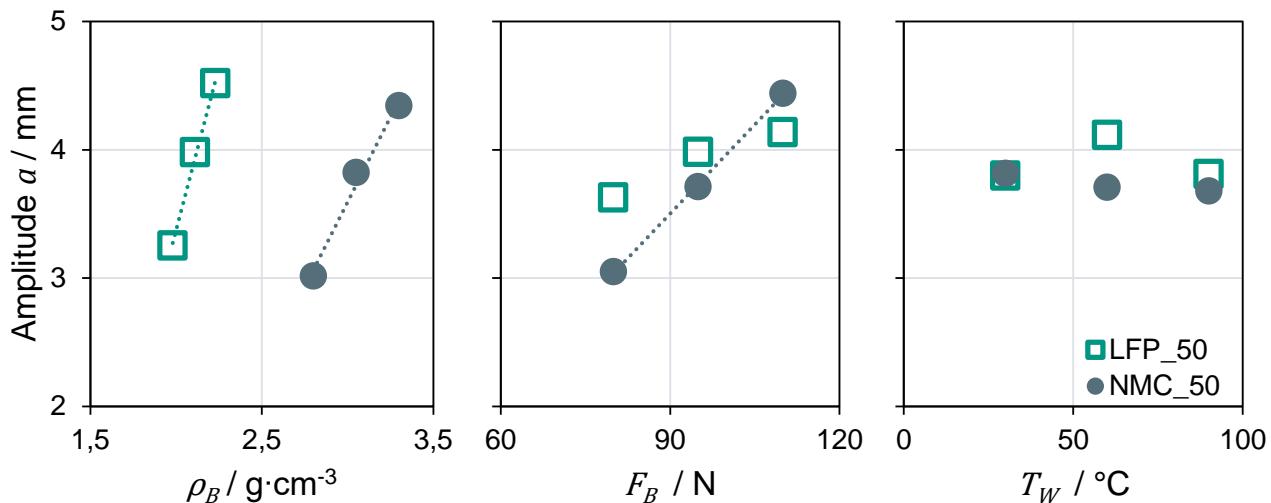


Abbildung 5-5 HE-Diagramm für die Amplitude a für LFP_50 und NMC_50

Die bereits beschriebene Längung des beschichteten Teils der Kathoden führt zu einer Ausgleichsbewegung der Kathoden in Form einer Welle. Da die Wellenlänge, wie in Abbildung 5-6 und Tabelle 5-2 gezeigt, von der Dichte unbeeinflusst bleibt, kann die zunehmende Längung nur durch die Erhöhung der Amplitude ausgeglichen werden.

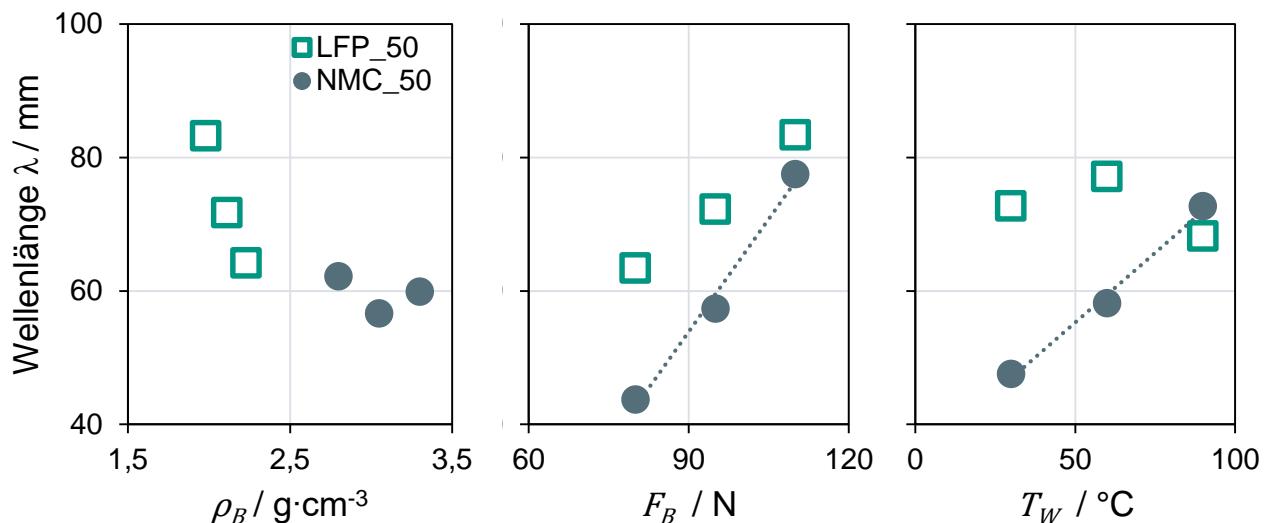


Abbildung 5-6 HE-Diagramm für die Wellenlänge λ für LFP_50 und NMC_50

Sowohl die Amplitude als auch die Wellenlänge nehmen in NMC_50 für einen steigenden Bahngeschwindigkeit zu. Das Material wird also mit steigendem Bahngeschwindigkeit stärker aus der Ebene

ausgelenkt und gleichzeitig in die Länge gezogen. Durch den Anteil des Bahnzugs, der insbesondere im Kalanderspalt am beschichteten Teil der Elektrode anliegt, werden die Wellen gestreckt, ohne dabei zusätzlich messbar an der Oberfläche gedeht zu werden. Dehnungen, die sich nahe dem Beschichtungsgrund befinden, sind durch das verwendete Messsystem nicht detektierbar. Dies könnte auch die Ursache sein, weshalb die Amplitude durch den Bahnzug ohne messbare Dehnung in y-Richtung zunimmt. Die durch den Bahnzug induzierten Dehnungen liegen nahe dem Substrat und tragen so zur stärkeren Auslenkung bei, sind aber nicht detektierbar.

Tabelle 5-2 p-Werte signifikanter HE für die Amplitude a und Wellenlänge λ

	Faktor	Amplitude a		Wellenlänge λ	
		NMC_50	LFP_50	NMC_50	LFP_50
HE	ρ_B	0,0012	0,0054	-	-
	F_B	0,0008	-	0,0006	-
	T_W	-		0,0053	-

In LFP_50 werden die gleichen Tendenzen beobachtet, diese sind jedoch nicht signifikant. Die Amplitude bleibt von Temperaturänderungen unbeeinflusst, während die Wellenlänge in NMC_50 mit steigender Temperatur zunimmt. In Kapitel 5.1.3 wird mit steigender Temperatur ein Steifigkeitsanstieg verzeichnet, der erklären könnte, warum die Welle in die Länge gestreckt wird. Der Widerstand gegen Auslenkung in z-Richtung ist zu groß, wodurch es eher zu einer Streckung kommt. Der Pearson-Korrelationskoeffizient kann diesen Zusammenhang mit $r = 0,164$ jedoch nicht bestätigen. Für LFP_50 ist kein Einfluss der Temperatur beobachtbar. Auch (Günther 2023, S. 121) kann keinen signifikanten Effekt der Temperatur nachweisen.

5.1.3 Biegesteifigkeit

Die in diesem Unterkapitel gezeigten Ergebnisse und Interpretationen sind in (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3–5) publiziert und werden im Folgenden aufgegriffen und vertieft. Abbildung 5-7 zeigt den Unterschied der breitenbezogenen Biegesteifigkeit S zwischen den unkalandrierten und kalandrierten Elektroden jeweils für NMC_50 und LFP_50. Dabei bezieht sich der Mittelwert auf alle Kalandrierversuche und die Standardabweichung zeigt die Streuung über alle Variationen. Da jedem Versuch stets die gleiche unkalandrierte Elektrode zuzuordnen ist, kann hier keine vergleichbare Standardabweichung angegeben werden. Die breitenbezogene Biegesteifigkeit des Al-

Substrats hat mit lediglich $0,035 \text{ N} \cdot \text{mm}$ einen sehr geringen Anteil an der Biegesteifigkeit der Kathoden (Klemens & Wurba et al. 2023, S. 10). Aufgrund der deutlich größeren Steifigkeit des beschichteten Teils der Kathoden, bildet sich die Längsfalte bevorzugt auf dem unbeschichteten Substratrand aus.

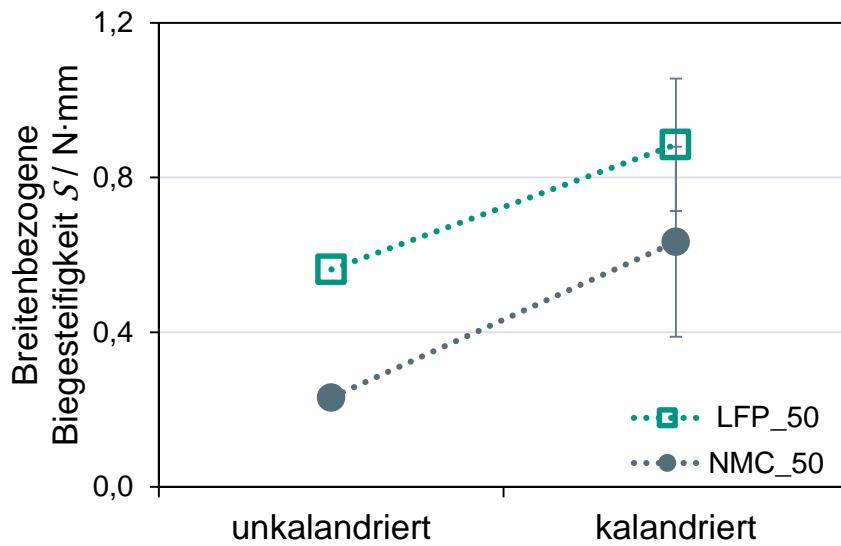


Abbildung 5-7 Vergleich der breitenbezogenen Biegesteifigkeit S für die Mittelwerte aus allen unkalandrierten und kalandrierten Elektroden für LFP_50 und NMC_50

LFP_50 zeigt im unkalandrierten wie im kalandrierten Zustand eine höhere breitenbezogene Biegesteifigkeit als NMC_50. In eigenen Versuchen in (Klemens & Wurba et al. 2023, S. 10) wird bei dem gleichen Material eine Erhöhung der breitenbezogenen Biegesteifigkeit mit zunehmender Schichtdicke beobachtet. Wie bereits in Kapitel 2.4.4.1 erläutert, werden in (Noelle & Wang et al. 2018) unterschiedlich hergestellte LCO-Kathoden und entsprechende Anoden mithilfe von Dreipunktbiegeversuchen untersucht. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls eine zunehmende Biegesteifigkeit bei zunehmender Schichtdicke. Beim Vergleich der Anode und Kathode mit gleich großer Schichtdicke weist die Anode eine höhere Biegesteifigkeit auf, obwohl sie eine geringere Aktivmaterialmasse aufweist. (Noelle & Wang et al. 2018, S. 129–130) Dies ist mit der geringeren Massenbeladung von LFP vergleichbar. Eine weitere Erklärung liefern die REM-Aufnahmen in Abbildung 4-3. Der sichtbar gleichmäßiger verteilte Binder sorgt möglicherweise für einen besseren Zusammenhalt zwischen den Partikeln und damit für eine höhere Biegesteifigkeit. Weiterhin ist in Abbildung 5-7 zu erkennen, dass die breitenbezogene Biegesteifigkeit durch die Kalandrierung im Vergleich zu der unkalandrierten Referenz erhöht wird, wobei die Erhöhung bei NMC_50 mit $\Delta S_{NMC_50} = 0,40 \text{ N} \cdot \text{mm}$

stärker ist als bei LFP_50 mit $\Delta S_{LFP_50} = 0,32 \text{ N} \cdot \text{mm}$. Eine mögliche Erklärung ist das deutlichere Eindringen der NMC811-Partikel in das Substrat. Es entsteht eine zusätzliche Bindung zwischen dem Substrat und der Beschichtung, die einen weiteren Widerstand gegen die Biegung darstellt. Dieser Effekt zeigt sich für die Dichte auch im HE-Diagramm in Abbildung 5-8 und in Tabelle 5-3.

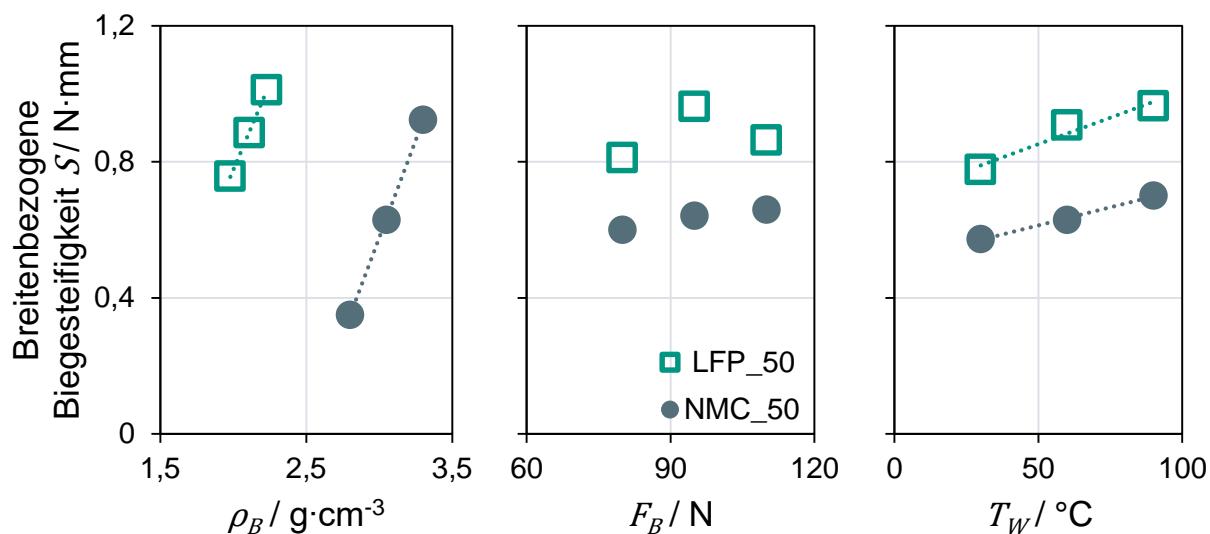


Abbildung 5-8 HE-Diagramm für die breitenbezogene Biegesteifigkeit S für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 4)

Es ist ein ausgeprägter, signifikanter positiver Einfluss auf die breitenbezogene Biegesteifigkeit zu erkennen. Je höher die Verdichtung ist, desto kleiner sind die Poren zwischen den Partikeln. Poren bieten keinen Widerstand gegen die Biegung, wohingegen die neu gebildeten Partikel-Partikel-Kontakte den Biegewiderstand erhöhen. Wie in Abbildung 4-27 und von (Gupta & Üçel et al. 2020, S. 851) gezeigt, wird die Innenseite der Beschichtung an der Biegestelle zusammengedrückt, während sie an der Außenseite auf Zug beansprucht wird. Während des Biegeversuchs bilden sich im komprimierten Teil der Beschichtung zusätzliche Partikel-Partikel-Kontakte, die der Biegung weiteren Widerstand entgegensetzen (Gupta & Üçel et al. 2020, S. 858). Die verdichteten Kathoden mit folglich höherer Dichte und somit geringerer Porosität haben daher eine höhere Biegesteifigkeit. Wie bereits von (Weinmann 2022, S. 82) vermutet, kann auch hier davon ausgegangen werden, dass die Eigenspannungen, deren Resultat die in dieser Arbeit gemessenen Dehnungen sind, zu einer Versteifung der Kathoden beitragen. Weitere WW werden nicht beobachtet. Aus Tabelle 5-3 geht hervor, dass der Bahnzug keinen signifikanten Einfluss auf die breitenbezogene Biegesteifigkeit hat.

Eine Erhöhung der Temperatur führt hingegen bei beiden Kathoden zu einem signifikanten Anstieg der breitenbezogenen Biegesteifigkeit. Die Erwärmung der Kathoden zum Zeitpunkt der Verdichtung kann zu einer Erweichung des PVDF-Binders führen (Meyer & Weyhe et al. 2020, S. 3). Der Binder wird elastischer und kann der Verschiebung der Partikel leichter folgen. Bestehende Bindungen werden daher geringer belastet und das Risiko der Beschädigung der Bindung während der Verdichtung sinkt. Denkbar ist auch, dass sich durch die neu entstehenden Partikelkontakte und dem weicheren Binder zusätzliche Bindungen ausbilden. Insgesamt ist das beobachtete Verhalten von NMC_50 und LFP_50 ähnlich.

(Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3–5)

*Tabelle 5-3 p-Werte signifikanter HE für die breitenbezogene Biegesteifigkeit S
(Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3)*

		Breitenbezogene Biegesteifigkeit S	
		NMC_50	LFP_50
HE	ρ_B	6,0450E-10	0,0055
	F_B	-	-
	T_w	0,0033	0,0291

5.1.4 Adhäsion

Der Vergleich der breitenbezogenen Haftkraft für beide Kathoden im kalandrierten und unkalandrierten Zustand ist in Abbildung 5-9 dargestellt. Analog zu Abbildung 5-7 gilt, dass die Mittelwerte aus allen Versuchen für NMC_50 und LFP_50 generiert werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die breitenbezogene Haftkraft im Falle des NMC_50 steigt, wenn die Elektrode kalandriert ist. Im Gegensatz dazu sinkt die Haftkraft der kalandrierten LFP-Proben ab und liegt dann unterhalb der kalandrierten NMC_50-Werte, aber oberhalb der unkalandrierten NMC_50-Werte. Im unkalandrierten Zustand weist LFP_50 eine deutlich höhere breitenbezogene Haftkraft auf als NMC_50.

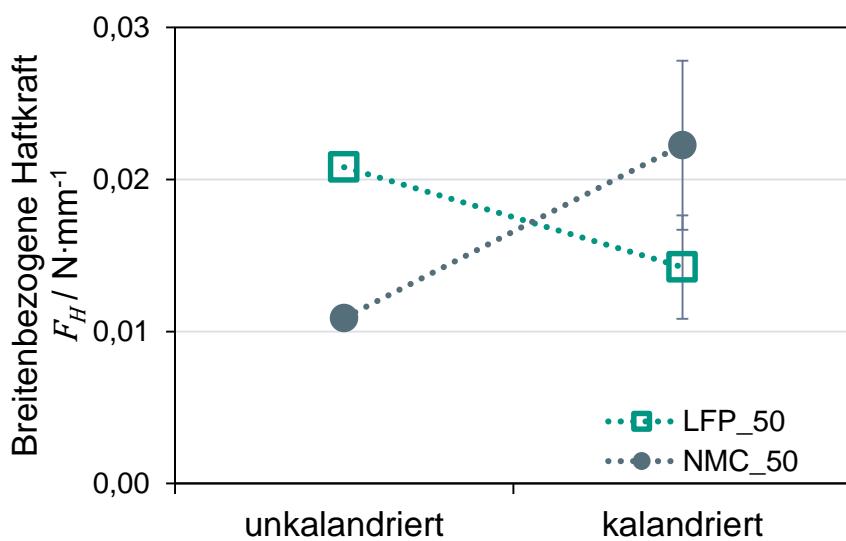


Abbildung 5-9 Vergleich der breitenbezogenen Haftkraft F_H für die Mittelwerte aus allen unkalandrierten und kalandrierten Elektroden für LFP_50 und NMC_50

Die Trends aus dem Vergleich zwischen unkalandrierten und kalandrierten Elektroden zeichnen sich auch in dem HE-Diagramm für die Dichte in Abbildung 5-10 ab. Mit steigender Dichte nimmt die breitenbezogene Haftkraft für LFP_50 weiter ab, während sie für NMC_50 steigt.

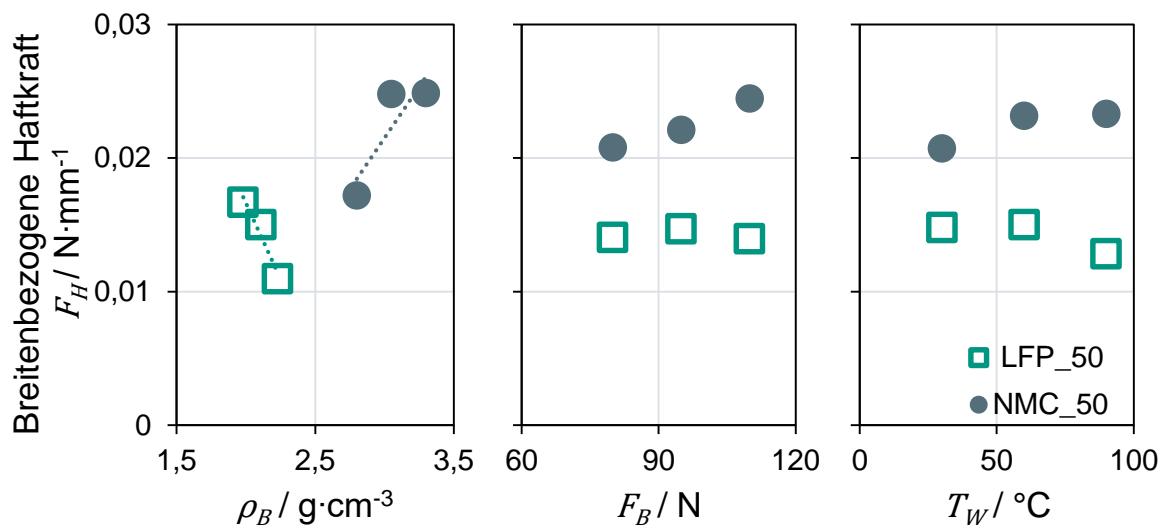


Abbildung 5-10 HE-Diagramm für die breitenbezogene Haftkraft F_H für LFP_50 und NMC_50

Aus Tabelle 5-4 geht weiterhin hervor, dass lediglich die Dichte einen signifikanten Einfluss auf die breitenbezogene Haftkraft hat. Zusätzliche WW werden nicht gefunden.

Tabelle 5-4 p-Werte signifikanter HE und WW für die breitenbezogene Haftkraft F_H

	Faktor	Breitenbezogene Haftkraft F_H	
		NMC_50	LFP_50
HE	ρ_B	0,0240	0,0036
	F_B	-	-
	T_W	-	-

Wie in Kapitel 2.4.4.2 erläutert, gibt es eine Vielzahl an Untersuchungen zur Adhäsion der Beschichtung auf dem Substrat. Die Ergebnisse dieser Studien geben jedoch keine eindeutigen Tendenzen vor und werden mit anderen Kathodenmaterialien als den hier verwendeten Kathoden durchgeführt. Lediglich die Untersuchungen von (Bold 2023) an NMC811-Kathoden zeigen ebenfalls eine Zunahme der Haftkraft mit steigender Dichte. Dieser Effekt lässt sich demnach analog erklären. Die NMC811-Partikel dringen in die Al-Folie ein und verhaken sich dort. (Bold 2023, S. 67) Dies zeigen auch die REM-Aufnahmen in Abbildung 4-3 für NMC_50. Somit entstehen mit steigender Dichte immer mehr zusätzliche Kontakte und stärkere Bindungen zwischen Substrat und Beschichtung, was zum beobachteten Anstieg der Haftkraft führt. Auch die Untersuchung des nach dem Abschälversuch verbliebenen Substrats der kalandrierten NMC_50-Probe in Abbildung 5-11b) zeigt eine deutliche dunkle Färbung. Dies spricht dafür, dass viele Partikel auch nach dem Abschälen noch im Substrat verankert sind.

Werden die REM-Aufnahmen des LFP betrachtet, so ergeben sich durch die vielen kleinen Partikel mehr Kontaktflächen zwischen Partikeln und Substrat, die für eine höhere Haftkraft des LFP im unkalandrierten Zustand sorgen könnten. Es ist außerdem denkbar, dass der feiner verteilte Binder ebenfalls mehr Kontakte zum Substrat aufbaut. Auch der Vergleich der Substratoberflächen der unkalandrierten Proben in Abbildung 5-11a) und c) zeigt für NMC_50 eine gröbere Graufärbung als für LFP_50. Weiter wird in (Meyer & Weyhe et al. 2020, S. 8) und auch in (Klemens & Wurba et al. 2023, S. 10) festgestellt, dass die Haftfestigkeit mit zunehmender Massenbeladung sinkt. Dies deckt sich mit den hier gefundenen Ergebnissen, da LFP_50 ein geringeres Flächengewicht als NMC_50 hat und dabei eine höhere breitenbezogene Haftkraft im unkalandrierten Zustand aufweist. Durch das Kalandrieren dringen die LFP-Partikel kaum in das Substrat ein, weshalb der Kraftanstieg aufgrund des Verhakens überwiegend ausbleibt. Dies bestätigt auch die sehr ähnliche Graufärbung der LFP-Proben in Abbildung 5-11c) und d). Möglicherweise tritt daher der unter anderem von (Dreger & Haselrieder et al.

2019, S. 233) beschriebene Effekt der Schwächung der Partikel-Substrat-Bindungen durch Scherung deutlicher zu Tage, was auch anhand von Abbildung 5-11d) zu vermuten ist, da eine deutlich hellere Graufärbung im Vergleich zu NMC_50 zu erkennen ist. Abbildung 5-11 zufolge kann außerdem bestätigt werden, dass für alle Proben die Adhäsionskraft gemessen wurde.

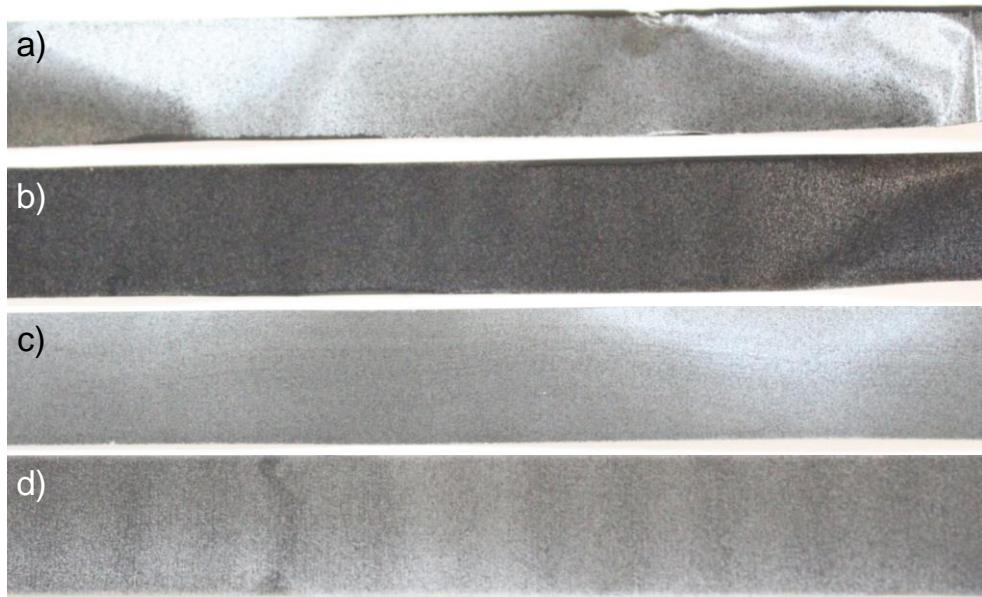


Abbildung 5-11 Folienoberfläche nach dem Abziehen der Beschichtung: a) NMC_50 unkal., b) NMC_50 max. kal., c) LFP_50 unkal., d) LFP_50 max. kal.

5.1.5 Reibung

Zur Untersuchung der Reibung zwischen Elektrode und Umlenkrolle werden jeweils unbeschichtete Al-Folie und der beschichtete Teil der unkalandrierten und kalandrierten Kathoden auf der Trägerplatte des Reibversuchsaufbaus festgeklemmt. In Abbildung 4-29 entspricht dies der Reibfläche 1. Die Umlenkrolle des Kalanders ist aus eloxiertem Al gefertigt, weshalb auf der Reibfläche des Schlittens ein Blech aus eloxiertem Al aufgeklebt wird. In Abbildung 4-29 entspricht dies der Reibfläche 2. Abbildung 5-12 zeigt, dass beide Reibungskoeffizienten für den Kontakt zwischen der Al-Folie, also dem Substrat, und dem eloxierten Al, also der Umlenkrolle, deutlich über den Werten der Kathoden liegen. Die Elektrode haftet also im beschichteten Abschnitt weniger stark und gleitet besser als im unbeschichteten Teil. Dies kann neben der steiferen Beschichtung eine weitere Erklärung sein, warum sich die Falten vorwiegend im unbeschichteten Bereich ausbilden. Die höhere Reibungskraft kann, wie in Kapitel 2.5.1 ausführlich erläutert, zu einem Überschreiten der kritischen Last führen, die Längsfalten hervorruft

(Jacques & Elias et al. 2007, S. 38). So ergeben sich im unbeschichteten Teil der Kathoden Spannungszustände, die durch die Reibung für eine Längsfaltenbildung ausreichen. Weiter ist zwischen den statischen und dynamischen Reibungskoeffizienten der Kathoden kaum ein Unterschied zu erkennen, was bedeutet, dass es nicht zu einem initialen Haften der Beschichtung auf der Umlenkrolle kommt. Auch ein signifikanter Unterschied zwischen kalandriertem und unkalandriertem Zustand und NMC811 und LFP ist kaum messbar, was allerdings am prototypischen Versuchsaufbau liegen kann.

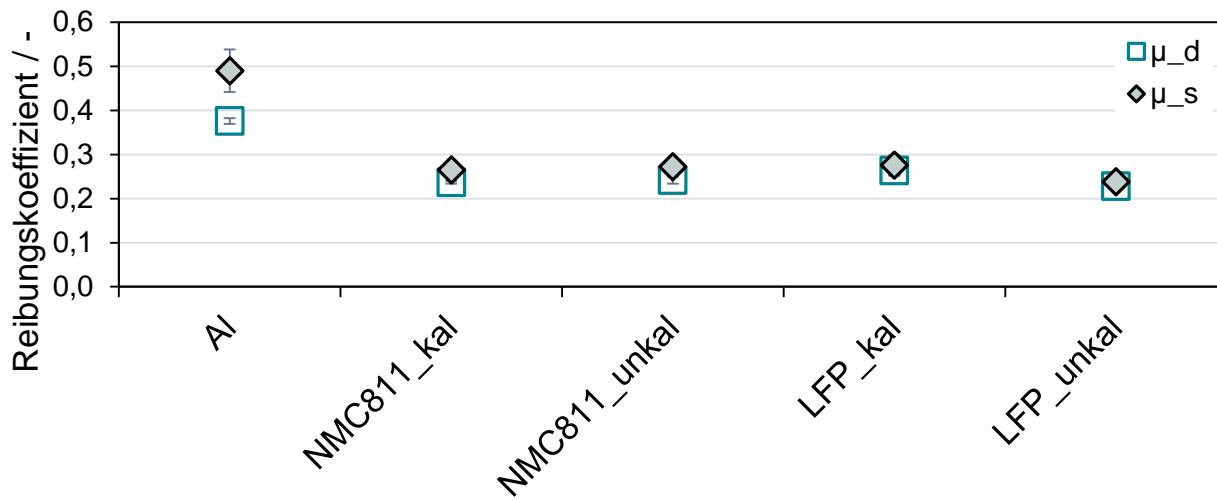


Abbildung 5-12 Reibungskoeffizienten für die angegebenen Materialien in Kontakt mit eloxiertem Al

5.1.6 Zwischenfazit

Abbildung 5-13 gibt einen Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse. Links sind die Korrelationen für die NMC-Kathoden (grau) und rechts für die LFP-Kathoden (grün) dargestellt. Die Pfeile symbolisieren die positiven und negativen Korrelationen zwischen den Prozessparametern in der Mitte und den jeweiligen Materialparametern außen. Es wird deutlich, dass sich die Kathoden NMC_50 und LFP_50 hinsichtlich der Dehnung, der breitenbezogenen Biegesteifigkeit und der Deformation ähneln. Insbesondere zeigt sich in beiden Kathoden für alle drei Materialparameter eine deutliche positive Abhängigkeit von der Dichte. Die hohe Verdichtung ruft Partikelverschiebungen hervor, die auch an der Oberfläche in Form von Dehnungen detektiert werden. Die breitenbezogene Biegesteifigkeit der Beschichtung wird durch die bei der Verdichtung entstehenden, zusätzlichen Partikelkontakte und -bindungen untereinander und zum Substrat erhöht. Eine Temperaturerhöhung begünstigt die Bildung weiterer Bindungen und erhöht die breitenbezogene Biegesteifigkeit weiter. Die Längung des beschichteten

Teils der Kathoden erfordert eine Ausgleichsbewegung in Form einer Welle mit zunehmender Amplitude. Für NMC_50 sorgt der steigende Bahnzug zusätzlich für eine Abflachung und Streckung der Welle. Die Temperatur sorgt für eine größere Wellenlänge in NMC_50.

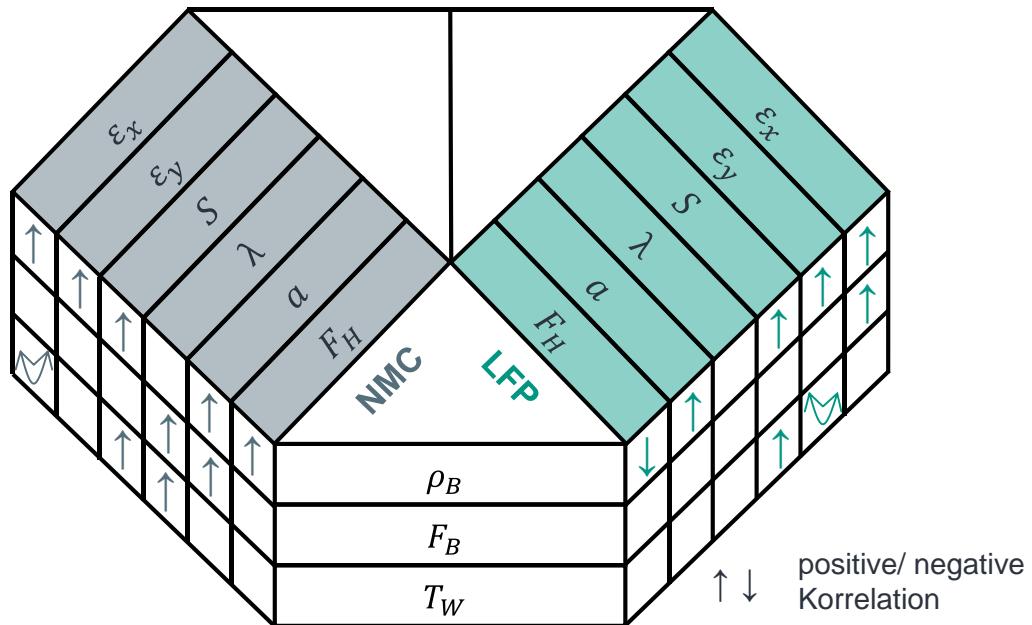


Abbildung 5-13 Übersicht über die signifikanten Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den Materialeigenschaften

Andererseits verhalten sich die Materialien in Bezug auf die breitenbezogene Haftkraft gegensätzlich. In NMC_50 sorgt das Eindringen der Partikel in das Substrat für eine Erhöhung der Adhäsion, während dieser Effekt in LFP_50 ausbleibt. Hier wird die Haf tung zwischen Beschichtung und Substrat durch die beim Kalandrieren auftretenden Scherkräfte beeinträchtigt.

Aus den Reibversuchen geht hervor, dass die Reibung zwischen der Beschichtung und der Umlenkrolle geringer ausfällt als zwischen dem unbeschichteten Substrat und der Umlenkrolle. Die Reibung trägt auch zur Bildung der Längsfalte bei, weshalb eine Ausbildung im unbeschichteten Bereich aufgrund dieser Erkenntnisse naheliegend ist.

5.2 Einfluss der Prozessparameter auf die Längsfalte

Bei der Aufstellung der Versuchspläne aus Kapitel 4.4 wird darauf geachtet, dass sich Längsfalten bilden, um diese analysieren zu können. In Versuch 7_NMC_30, also bei niedriger Dichte, Bahnzug und Temperatur kommt es jedoch nur in unregelmäßigen Abständen zur Bildung von Längsfalten. Hier scheint die Grenze zwischen stabiler und

ausbleibender Längsfaltenbildung zu liegen. Um diese Vermutung zu bestätigen, werden weitere Versuche mit einem niedrigeren Bahnzug von $F_B = 60 \text{ N}$ durchgeführt. Es kann keine Längsfaltenbildung beobachtet werden, weshalb die Versuche im Weiteren nicht weiter analysiert werden. Dies bestätigt, dass eine kritische Bahnspannung überschritten werden muss, damit sich Längsfalten bilden. Dies wird auch für eine HC-Anode in (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 316) beobachtet. Auch in der industriellen Verarbeitung von Metallfolien ist bekannt, dass eine kritische Bahnspannung für die Bildung von Längsfalten benötigt wird (Jacques & Elias et al. 2007, S. 33). In Abbildung 5-14a) ist die aus der Bahnspannung resultierende Anpresskraft F_{FP} , welche eine Flächenpressung hervorruft, schematisch dargestellt. Die Streckkraft F_{str} wird in Kapitel 7.1 eingeführt und an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt. Durch die Längung der Elektrode greift ein Großteil des Bahnzugs am unbeschichteten Substrat an, weshalb dieses auf der Umlenkrolle geklemmt wird. Durch die größere Reibung wird dieser Effekt noch verstärkt.

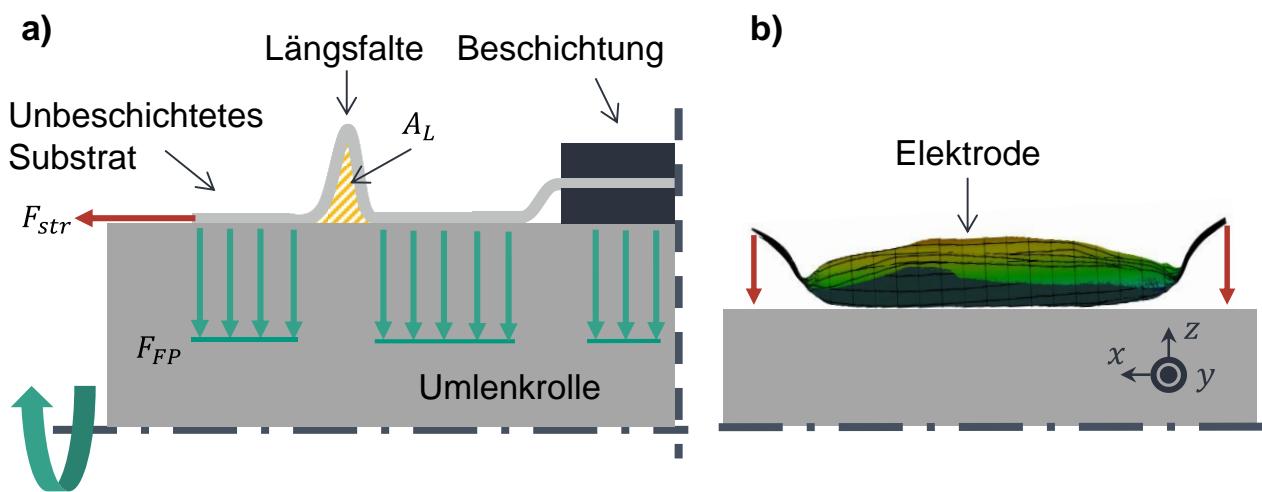


Abbildung 5-14 a) Schematische Darstellung der Längsfaltenbildung mit der Anpresskraft F_{FP} und der Streckkraft F_{str} (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 500; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 2) b) ankommende deformierte Elektrode

Abbildung 5-14b) zeigt ergänzend, wie die deformierte Elektrode auf die Umlenkrolle auftrifft. Der unbeschichtete Randbereich des Substrats hebt sich deutlich aus der xy-Ebene heraus. Der beschichtete Teil befindet sich aufgrund der Längung ebenfalls überwiegend außerhalb der xy-Ebene. In (Friedl & Rammerstorfer et al. 2000, S. 186, 189) wird anschaulich gezeigt, dass sich die Bahn unter Zugbelastung zusammenzieht. Somit wirken Querkräfte, die zur Mitte der Elektrode zeigen. Durch die größere Biegesteifigkeit des beschichteten Teils der Elektrode wird die Kompensation beim Auftreffen

der Elektrode auf die Umlenkrolle in den unbeschichteten Bereich getrieben, wo sich aufgrund der Klemmung eine Längsfalte ausbildet. Bei einem geringeren Bahnzug hat die Elektrode eine größere Bewegungsfreiheit quer zur Laufrichtung, also in x-Richtung. Der unbeschichtete Teil des Substrats kann sich minimal bewegen und somit entspannen. Auch der beschichtete Teil wird weniger stark gegen die Umlenkrolle gepresst, sodass zwischen der Beschichtung und der Umlenkrolle noch minimale Hohlräume vorhanden sein können. Eine Ausgleichsbewegung in Form einer Längsfalte zur Kompen-sation der Verformung ist somit nicht notwendig.

Im Folgenden wird der Einfluss der Prozessparameter auf die Geometrie der Längsfalte, also Höhe, Breite und Distanz zwischen Längsfalte und Beschichtungskante, dar-gelegt. Die an dieser Stelle gezeigten Erkenntnisse sind Teil von (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5–7) und in überarbeiteter Form dargestellt.

5.2.1 Höhe der Längsfalte

In Abbildung 5-15 ist das HE-Diagramm für die mittleren Höhen der Längsfalten für LFP_50 und NMC_50 dargestellt. Alle Werte liegen in einem ähnlichen Bereich.

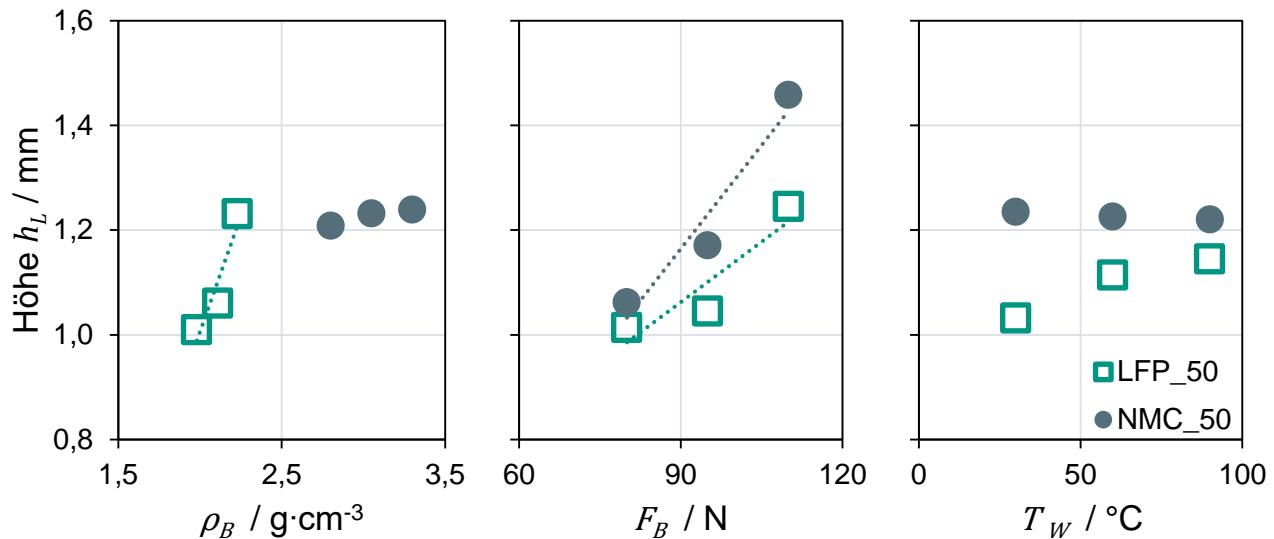


Abbildung 5-15 HE-Diagramm für die Längsfaltenhöhe h_L für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)

Aus Tabelle 5-5 geht hervor, dass lediglich der Bahnzug einen starken signifikanten positiven Effekt auf die Höhe der Längsfalten in NMC_50 hat. Der gleiche Effekt ist ebenso für die LFP-Kathoden zu beobachten, auch wenn dieser weniger stark ausge-prägt ist. Für beide Kathoden bewirkt ein größerer Bahnzug also höhere Längsfalten.

In (Flores-Johnson & Rupert et al. 2015) werden uniaxiale Streckungen an defekten Al-Folien mithilfe von FEM analysiert. Zunehmende Dehnungen führen zu zunehmenden Amplituden der parallel zur Spannungsachse auftretenden Falten (Flores-Johnson & Rupert et al. 2015, S. 2, 5,15). Dies bestätigt die in dieser Arbeit gefundenen Beobachtungen, denn der Übergang zwischen dem beschichteten und dem unbeschichteten Teil könnte auch als eine Art Defekt angesehen werden, der die Inhomogenität der kalandrierten Elektrode betont. Die Amplitude ist in diesem Fall als Längsfaltenhöhe zu betrachten.

Tabelle 5-5 p-Werte signifikanter HE für die Längsfaltenhöhe h_L

	NMC_50	LFP_30
ρ_B	-	0,036
F_B	0,007	0,029
T_W	-	-

Für LFP_50 wird zusätzlich eine Zunahme der Höhe bei steigender Dichte beobachtet. Aus den negativen Pearson-Korrelationskoeffizienten r mit -0,698 (NMC_50) und -0,718 (LFP_50) geht eine negative lineare Korrelation der Höhe und Breite hervor. Daher wird die Längsfaltenhöhe gemeinsam mit der Breite im folgenden Kapitel 5.2.2 erläutert.

(Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5–6)

5.2.2 Breite der Längsfalte

Abbildung 5-16 zeigt das HE-Diagramm für die durchschnittliche Breite der Längsfalten für LFP_50 und NMC_50. Analog zur Höhe liegen alle Breiten in einem ähnlichen Wertebereich. Für die Breite der Längsfalten wird anhand von Tabelle 5-6 bei beiden Kathoden ein signifikanter negativer Effekt des Bahnzugs detektiert.

Tabelle 5-6 p-Werte signifikanter HE für die Längsfaltenbreite b_L (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)

	NMC_50	LFP_50
ρ_B	0,095	1,97E-04
F_B	0,046	0,037
T_W	-	0,007

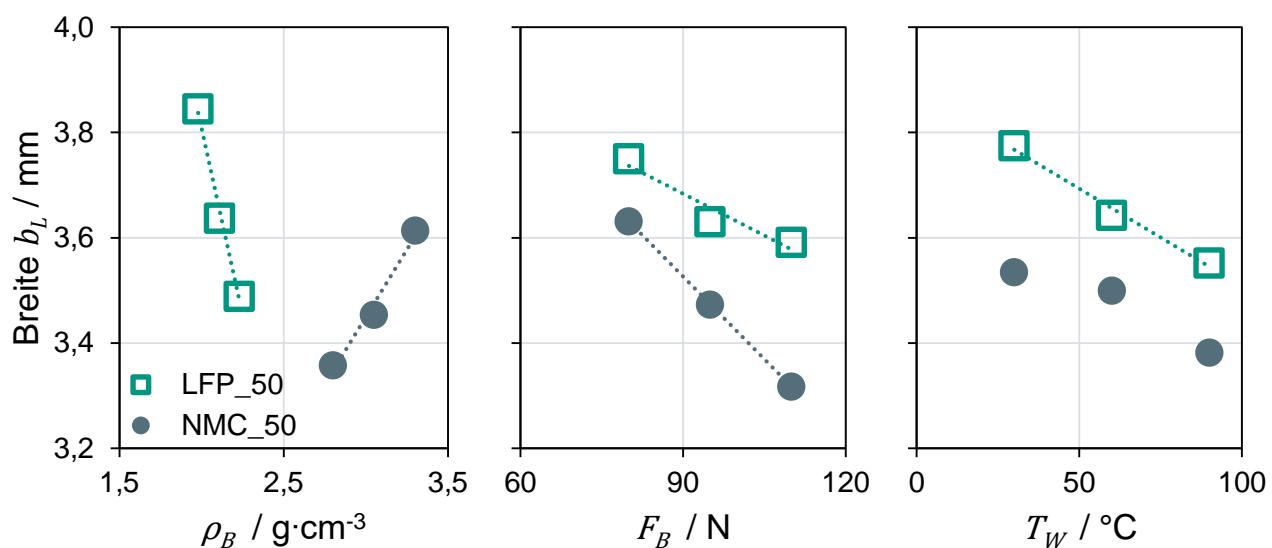


Abbildung 5-16 HE-Diagramm für die Längsfaltenbreite b_L für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 6)

Wie bereits zu Beginn beschrieben, schränkt die hohe resultierende Bahnspannung und damit Flächenpressung des unbeschichteten Substrats auf der Umlenkrolle die Bewegungsfreiheit der Elektrode quer zur Laufrichtung ein. Die sich gerade bildende Längsfalte ist vor dem Auftreffen auf die Umlenkrolle (Zone A) deutlich breiter, wie in Zone C von Abbildung 5-17 zu erkennen ist.

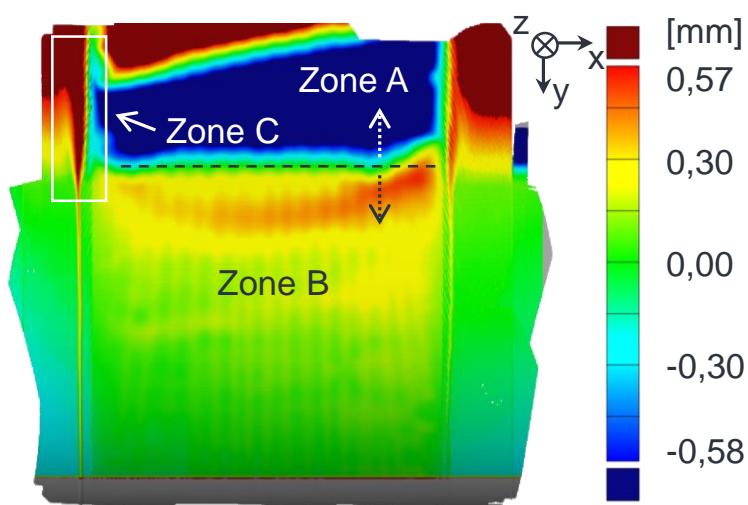


Abbildung 5-17 3D-Scan der Elektrode beim Auftreffen auf die Umlenkrolle (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 502)

Die Längsfalte kann sich demnach auf der Umlenkrolle (Zone B) nicht ausbreiten, sondern wird durch die bereits beschriebene Einschnürung der Bahn zusammengezogen. Weiter schiebt die zunehmende x-Dehnung die Falte zusammen.

Unter Berücksichtigung der Höhe (vgl. Kapitel 5.2.1) kann gezeigt werden, dass die mit größerem Bahnzug schmaleren Längsfalten höher werden, da das verdrängte Material kompensiert werden muss. Die Fläche der Längsfalte $A_{LF, approx.}$ (vgl. Abbildung 4-7), die durch den Teil des unbeschichteten Substrats und der Umlenkrolle aufgespannt wird, bewegt sich somit innerhalb eines stabilen Wertebereichs.

Bei NMC_50 zeigt die Dichte einen positiven, schwach signifikanten Einfluss auf die Breite der Längsfalte. Die naheliegendste Erklärung ist die Zunahme des verdrängten Materials infolge der höheren Verdichtung und Deformation und damit einhergehend eine Längsfalte mit höherer Breite. Allerdings ist für LFP_50 das Gegenteil zu beobachten, da die Dichte einen starken negativen Einfluss auf die Längsfaltenbreite aufweist. Ähnlich wie für den Bahnzug scheinen sich die Kompensationseffekte für die Dichte als schmalere, aber höhere Längsfalten auszuprägen. Dies deutet auch auf die Ausbildung der Längsfaltenfläche in einem gewissen Wertebereich hin. Für NMC_50 kann dieser vermutete Zusammenhang zwischen Dichte und Längsfaltenfläche jedoch nicht bestätigt werden, da der Zusammenhang zwischen Höhe und Dichte nicht signifikant ist (vgl. Tabelle 5-5).

Der einzige Unterschied zwischen den beiden Kathoden ist das Beschichtungsmaterial selbst, weshalb davon auszugehen ist, dass das Materialverhalten einen Einfluss auf die Ausbildung der Längsfalten hat. Weiter zeigt Tabelle 5-6 für LFP_50 einen signifikanten negativen Zusammenhang zwischen Höhe und Kalanderwalzentemperatur. Dabei gilt es zu beachten, dass die Elektrode zum Zeitpunkt der Verdichtung durch den Walzenkontakt erwärmt wird. Bei einer Bahngeschwindigkeit von lediglich $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ und einem Abstand von etwa 2,3 m zwischen dem Walzenkontakt und der Umlenkrolle trifft die Elektrode wieder erkaltet auf die Umlenkrolle. Die Temperatur kann also keinen direkten Einfluss auf die Längsfaltenbildung haben. Da dennoch signifikante Zusammenhänge beobachtet werden, ist davon auszugehen, dass die Einflussnahme indirekt über das Materialverhalten erfolgt. Die detaillierte Diskussion des Einflusses des Materialverhaltens ist in Kapitel 5.3 zu finden.

(Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5–6)

5.2.3 Distanz der Längsfalte zur Beschichtungskante

Aus dem HE-Diagramm für die Distanz der Längsfalte von der Beschichtungskante in Abbildung 5-18 geht hervor, dass alle Mittelwerte für LFP_50 und NMC_50 in einem ähnlichen Wertebereich liegen.

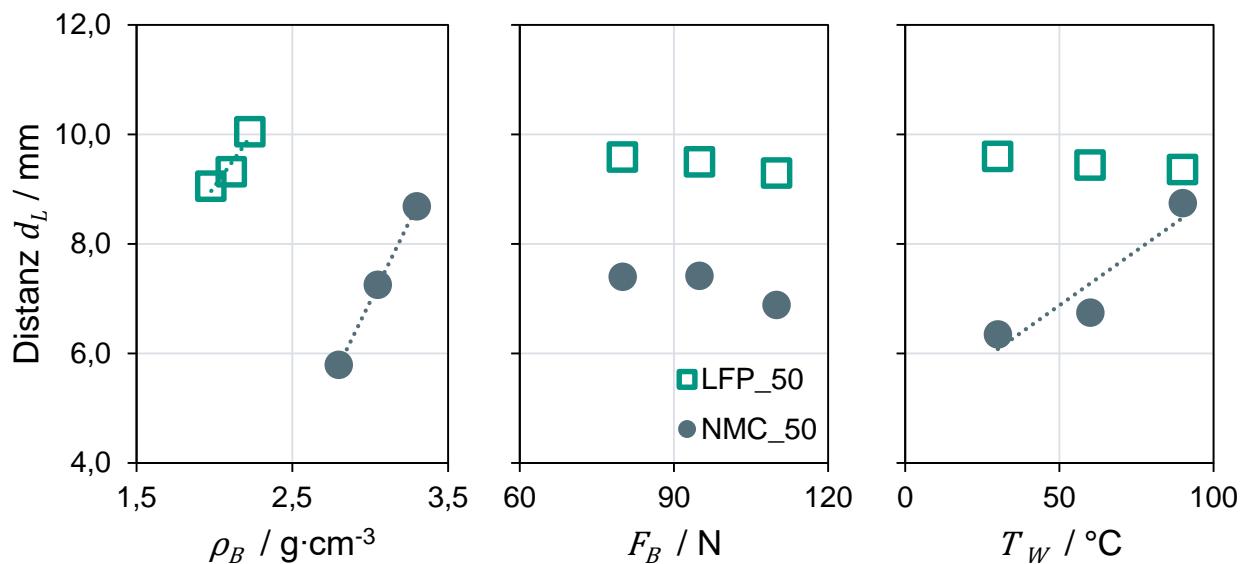


Abbildung 5-18 HE-Diagramm für die Distanz d_L für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 6)

Tabelle 5-7 zeigt, dass die Dichte einen signifikanten positiven Einfluss auf die Distanz hat.

Tabelle 5-7 p-Werte signifikanter HE für die Distanz d_L (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)

	NMC_50	LFP_50
ρ_B	0,002	0,086
F_B	-	-
T_W	0,008	-

Die Längsfalten treten also bei höheren Dichten weiter entfernt von der Beschichtungskante auf. Mit den Pearson-Korrelationskoeffizienten von -0,339 (NMC_50) und 0,083 (LFP_50) kann keine signifikante Korrelation zwischen Höhe und Distanz bzw. mit 0,366 (NMC_50) und -0,424 (LFP_50) zwischen Distanz und Breite gefunden werden. Die Betrachtung verschiedener Breiten des unbeschichteten Substrats gibt dennoch Hinweise auf eine Interpretation, weshalb an dieser Stelle auf Kapitel 5.4.3 verwiesen

wird. Für NMC_50 wird weiterhin ein signifikanter positiver Einfluss der Temperatur beobachtet. Wie bereits in Kapitel 5.2.2 erläutert, beeinflusst die Temperatur die Längsfaltenbildung indirekt, weshalb für die Diskussion der Materialeinflüsse erneut auf Kapitel 5.3 verwiesen wird.

(Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5–7)

5.2.4 Zwischenfazit

Zunächst wird bestätigt, dass für die Bildung von Längsfalten ein bestimmter Mindestbahnzug anliegen muss. Andernfalls sind Ausgleichsbewegungen der Elektrode möglich. Zwischen der Höhe und der Breite der Längsfalte liegt für beide Kathoden eine negative Korrelation vor. Eine Steigerung der einen Größe bedeutet also eine Reduktion der anderen Größe. In Abbildung 5-19 ist dies durch die Verbindungslien mit den farbigen Korrelationspfeilen angedeutet. Die Übersichtsgrafik zeigt außerdem die signifikanten Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Geometrie der Längsfalte analog zu Abbildung 5-13 als zusammenfassende Übersicht.

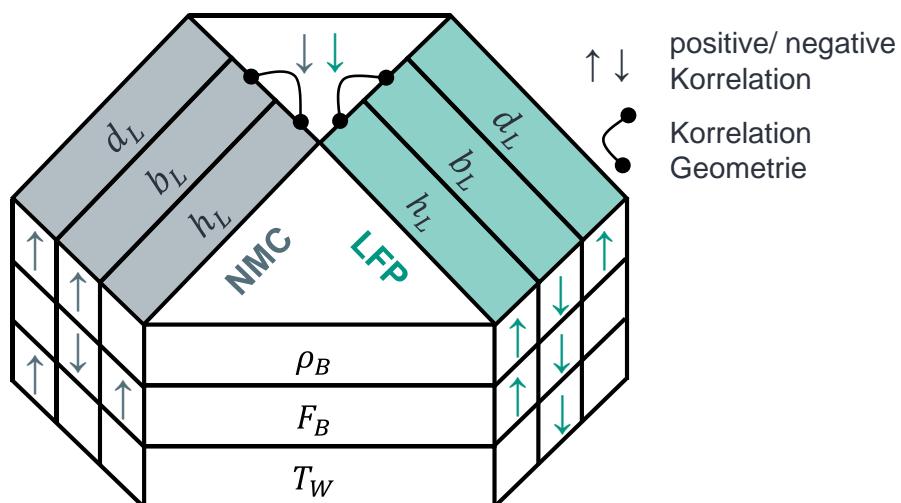


Abbildung 5-19 Übersicht über die signifikanten Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Längsfaltengeometrie

Für beide Kathoden ist der Bahnzug signifikant, wobei die Längsfaltenhöhe mit steigendem Bahnzug zunimmt und die Faltenbreite abnimmt. Es stellt sich demnach ein gewisses Verhältnis ein, welches als Längsfaltenfläche eingeführt wird. Gleicher gilt für den Einfluss der Dichte auf die Breite in LFP_50. Im Gegensatz dazu steigt die Faltenhöhe mit zunehmender Dichte in LFP_50. Dieser Effekt kann mit der zu kompensierenden Materialmenge erklärt werden. Der negative Einfluss der Temperatur auf die Breite

in LFP_50 wird auf die Materialeigenschaften zurückgeführt und in Kapitel 5.3 diskutiert.

Mit steigender Dichte ist die Längsfalte in einem größeren Abstand zur Beschichtungskante lokalisiert. Ein Zusammenhang zur Höhe und Breite der Längsfalte kann nicht gefunden werden. An dieser Stelle wird auf den Einfluss der Breite des unbeschichteten Substrats in Kapitel 5.4 und die Materialeigenschaften in Kapitel 5.3 verwiesen.

Diese Untersuchungen legen nahe, dass eine Reduktion der Längsfaltenbildung innerhalb des untersuchten Prozessfensters durch die Einstellung der Parameter Dichte, Bahnzug und Temperatur nicht möglich ist, da die Längsfaltenhöhe und Breite direkt negativ korrelieren. Eine Reduktion der Dichte und des Bahnzugs aus diesem Prozessfenster heraus würde die Längsfaltenbildung stoppen. Allerdings werden dann die Forderungen nach einer hohen volumetrischen Energiedichte und hohen Prozessgeschwindigkeiten nicht mehr erfüllt. Eine zusätzliche Kompensationsmaßnahme ist daher unabdingbar und wird in Kapitel 7 diskutiert.

5.3 Einfluss des Materialverhaltens auf die Längsfalte

Im Folgenden werden die bereits in Kapitel 5.1 diskutierten Materialeigenschaften hinsichtlich ihres Einflusses auf die in Kapitel 5.2 beschriebene Geometrie der Längsfalte geprüft. Dazu wird eine Analyse der Pearson-Korrelationskoeffizienten r genutzt.

5.3.1 Dehnung

Die hier gezeigten, überarbeiteten Erkenntnisse entstammen (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 7). In Kapitel 5.1.1 wird gezeigt, dass eine hohe Verdichtung zu höheren Dehnungen führt, was eine stärkere Materialverdrängung mit sich bringt. Das sichtbare Resultat ist eine höhere Längsfalte bei zunehmender Dichte und Dehnung, was durch die zwar überwiegend schwachen, aber positiven Pearson-Korrelationen in Tabelle 5-8 bestätigt wird. Für LFP_50 ist die Korrelation signifikant.

Hinsichtlich der Längsfaltenbreite wird für LFP_50 eine signifikante negative Korrelation zur x- und y-Dehnung festgestellt. Die Längsfalte wird also schmäler. Dies passt zum positiven Einfluss der Dichte auf die Dehnungen und zum negativen Einfluss auf die Breite. In NMC_50 ist hingegen kein Effekt zu beobachten. In Kapitel 5.2.2 wird außerdem die signifikante negative Beziehung zwischen der Breite und der Temperatur in LFP gefunden. Der Einfluss der Temperatur ist jedoch nur für die y-Dehnung in LFP_50

mit quadratischer Beziehung signifikant. Die Zusammenhänge sind komplex und daher ohne zusätzliches Wissen nicht weiter eindeutig interpretierbar.

Der positive Zusammenhang zwischen Dichte und Distanz sowie zwischen Dichte und Dehnungen untermauern die positiven Korrelationskoeffizienten zwischen Distanz und Dehnungen, wobei ausschließlich die y-Dehnung in NMC_50 signifikant ist. Die zugrundeliegenden Eigenspannungen und insbesondere die für die x-Dehnung verantwortliche Spannung treiben die Längsfalte nach außen. In Kapitel 5.2.3 wird außerdem ein positiver signifikanter Einfluss der Temperatur auf die Distanz in NMC_50 aufgezeigt. Auch hier ist die Interpretation aufgrund des quadratischen Zusammenhangs der y-Dehnung mit der Temperatur nicht eindeutig.

Tabelle 5-8 Pearson-Korrelationskoeffizienten r für die Beziehung zwischen x- und y-Dehnung und der Geometrie der Längsfalte, links NMC_50 in grau und rechts LFP_50 in grün, fett markierte Werte sind signifikant (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 7)

	Höhe	Breite	Distanz
x-Dehnung	0,287	0,653	0,099
y-Dehnung	0,392	0,394	-0,014

(Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 7)

5.3.2 Deformation

Aus Tabelle 5-9 ist zu erkennen, dass lediglich zwischen der Höhe und der Amplitude sowie der Wellenlänge in NMC_50 eine signifikante positive Korrelation besteht.

Tabelle 5-9 Pearson-Korrelationskoeffizienten r für die Beziehung zwischen der Amplitude und Wellenlänge und der Geometrie der Längsfalte, links NMC_50 in grau und rechts LFP_50 in grün, fett markierte Werte sind signifikant

	Höhe	Breite	Distanz
Amplitude	0,608	-0,354	-0,099
Wellenlänge	0,511	-0,458	-0,444

Dieser Zusammenhang wird auf den Bahnzug zurückgeführt, der ebenfalls einen signifikanten Zusammenhang zu Höhe, Amplitude und Wellenlänge zeigt. Weiter ist naheliegend, dass eine größere Auslenkung des Materials stärker kompensiert werden muss, was die Längsfaltenhöhe zunehmen lässt. Die im Gegensatz dazu unerwartet negativen Korrelationen für LFP_50 lassen sich über die Zusammenhänge zwischen

den Prozess- und Materialparametern sowie zur Längsfaltengeometrie nicht erklären. Sie sind jedoch auch nicht signifikant.

5.3.3 Biegesteifigkeit

Die Inhalte dieses Unterkapitels sind aus (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 7) entnommen und in einer überarbeiteten Form dargestellt. Aus Tabelle 5-10 wird deutlich, dass die breitenbezogene Biegesteifigkeit nur einen geringen und nicht signifikanten positiven Effekt auf die Höhe der Längsfalte in beiden Kathoden hat. Für NMC_50 kann kein Einfluss auf die Breite gefunden werden, während auch für die Distanz in LFP_50 kein Einfluss auf die Distanz erkennbar ist. Für alle genannten Geometriegrößen kann in Kapitel 5.2 auch kein signifikanter Effekt für die Temperatur nachgewiesen werden, der, wie bereits beschrieben, auf einen Einfluss der Materialeigenschaften hinweisen würde.

Für die Breite in LFP_50 und die Distanz in NMC_50 wird im Gegensatz dazu ein Einfluss der Temperatur gefunden. Die Temperatur hat, wie in Kapitel 5.1.3 beschrieben, ebenso wie die Dichte einen positiven Effekt auf die Biegesteifigkeit. Die negative Korrelation zwischen der Breite und der Biegesteifigkeit für LFP_50 passt also zum negativen Einfluss der Dichte und Temperatur auf die Breite der Längsfalte. Die gleichen Schlüsse können für die positive Korrelation zwischen Distanz und Biegesteifigkeit für NMC_50 gezogen werden, da Dichte und Temperatur auch einen positiven Einfluss auf die Distanz haben.

Eine höhere Biegesteifigkeit der Beschichtung verhindert die Längsfaltenbildung in der Beschichtung und zwingt sie in den unbeschichteten Bereich auszuweichen. Eigene Messungen der Biegesteifigkeit an Kathoden und Anoden für LIB und NIB und deren Substrate zeigen, dass die Substrate eine deutlich niedrigere Biegesteifigkeit als die Elektroden haben (Klemens & Wurba et al. 2023, S. 10).

Tabelle 5-10 Pearson-Korrelationskoeffizienten r für die Beziehung zwischen der breitenbezogenen Biegesteifigkeit und der Geometrie der Längsfalte, links NMC_50 in grau und rechts LFP_50 in grün, fett markierte Werte sind signifikant (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 7)

	Höhe	Breite	Distanz
Breitenbezogene Biegesteifigkeit	0,303	0,323	0,063 -0,590 0,754 -0,049

(Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 7)

5.3.4 Adhäsion

Tabelle 5-11 zeigt lediglich einen signifikanten positiven Effekt der breitenbezogenen Haftkraft in NMC_50. Dieser ist zwar signifikant positiv von der Dichte abhängig, jedoch ist lediglich ein minimal positiver und nicht signifikanter Einfluss der Dichte auf die Höhe messbar.

Tabelle 5-11 Pearson-Korrelationskoeffizienten r für die Beziehung zwischen der breitenbezogenen Haftkraft und der Geometrie der Längsfalte, links NMC_50 in grau und rechts LFP_50 in grün, fett markierte Werte sind signifikant

	Höhe	Breite	Distanz
Breitenbezogene Haftkraft	0,550	-0,235	-0,377 0,395 0,294 -0,029

5.3.5 Zwischenfazit

In Abbildung 5-20 sind die signifikanten Effekte der Materialeigenschaften auf die Geometrie der Längsfalte im Überblick analog zu Abbildung 5-13 und Abbildung 5-19 dargestellt.

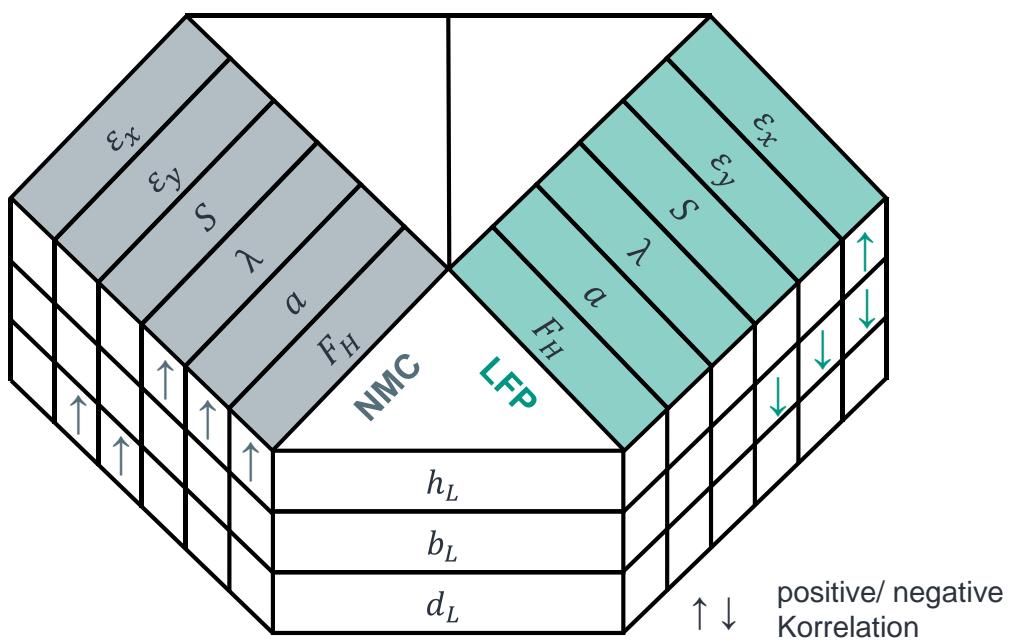


Abbildung 5-20 Übersicht über die signifikanten Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Längsfaltengeometrie

Nur die x-Dehnung hat einen signifikanten positiven Einfluss auf die Höhe in LFP, während für NMC_50 die breitenbezogene Haftkraft sowie Amplitude und Wellenlänge

jeweils einen signifikanten positiven Effekt zeigen. Für die Breite wird in LFP_50 ein signifikanter negativer Effekt der Dehnungen und der breitenbezogenen Biegesteifigkeit beobachtet. Für NMC_50 zeigt keine der Materialeigenschaften einen signifikanten Einfluss auf die Breite. Die Distanz für LFP_50 bleibt ebenfalls unbeeinflusst. Für NMC_50 zeigt sich jedoch ein signifikanter positiver Einfluss der y-Dehnung und der breitenbezogenen Biegesteifigkeit. Insgesamt sind die Materialeinflüsse auf die Geometrie der Längsfalte komplex. Es gibt für keinen Materialparameter signifikante Zusammenhänge, die für beide Kathoden gelten. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass noch weitere Materialeigenschaften die Längsfaltenbildung beeinflussen, die hier nicht untersucht werden konnten. Insbesondere der Einfluss des Binders und der Binderverteilung auf die Materialeigenschaften und das Temperaturverhalten des Binders könnten weitere Erkenntnisse liefern. Von besonderem Interesse sind außerdem die Spannungszustände innerhalb der Beschichtung, die hier lediglich anhand der Oberflächenwerte repräsentiert sind. Diese könnten zur Erklärung der Deformation und Einschnürung der Elektrode beitragen. Weiter überschreitet kein Pearson-Korrelationskoeffizient den Wert $|r| = 0,754$. Das bedeutet, dass selbst die signifikanten linearen Beziehungen eher undeutlich ausgeprägt sind.

5.4 Einfluss des Elektrodenformats auf die Längsfalte

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse stammen teilweise aus (Wurba & Altmann et al. 2024; Wurba & Goldschmidt et al. 2024) und sind hier aufbereitet dargelegt.

In diesem Kapitel soll der Einfluss der Breite des unbeschichteten Substrats b_{Sub} auf die Bildung der Längsfalten untersucht und diskutiert werden. Dazu werden die Ergebnisse für NMC_50, die in Kapitel 5.2 dargelegt werden, nun mit der Längsfaltenbildung in NMC_30 verglichen. Die beiden Kathoden unterscheiden sich lediglich durch die Breite des unbeschichteten Substrats. Der Anteil des unbeschichteten Substrats an der Gesamtelektrodenbreite beträgt für NMC_30 27,91 % und für NMC_50 39,22 %, was einer Zunahme um 40,52 % entspricht. Insgesamt ist also bei NMC_50 durch das unbeschichtete Substrat ein größerer Anteil der Kathode auf der Umlenkrolle geklemmt. Wie in Kapitel 5.1.2 und 5.2 beschrieben, trifft die Elektrode deformiert auf die Umlenkrolle und steht nicht vollständig mit der Umlenkrolle in Kontakt.

Für eine Diskussion der erreichten Linienlasten in Abhängigkeit der Prozessparameter für die Versuchsreihe mit NMC_30 wird auf (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 500) verwiesen.

5.4.1 Höhe der Längsfalte

Der Vergleich der Längsfaltenhöhe zwischen NMC_30 und NMC_50 in Abbildung 5-21 zeigt keine klaren Zusammenhänge, da keiner der Faktoren Dichte, Bahnzug und Temperatur gleichzeitig für beide Kathoden signifikant ist und der jeweils nicht signifikante Faktor keine Tendenzen anzeigt. Der Faktor Dichte ist für NMC_30 mit $p = 0,082$ signifikant. Die Breiten des unbeschichteten Substrats unterscheiden sich um 66,67 %. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Längsfaltenhöhe für das breitere unbeschichtete Substrat um 85,46 % zunimmt.

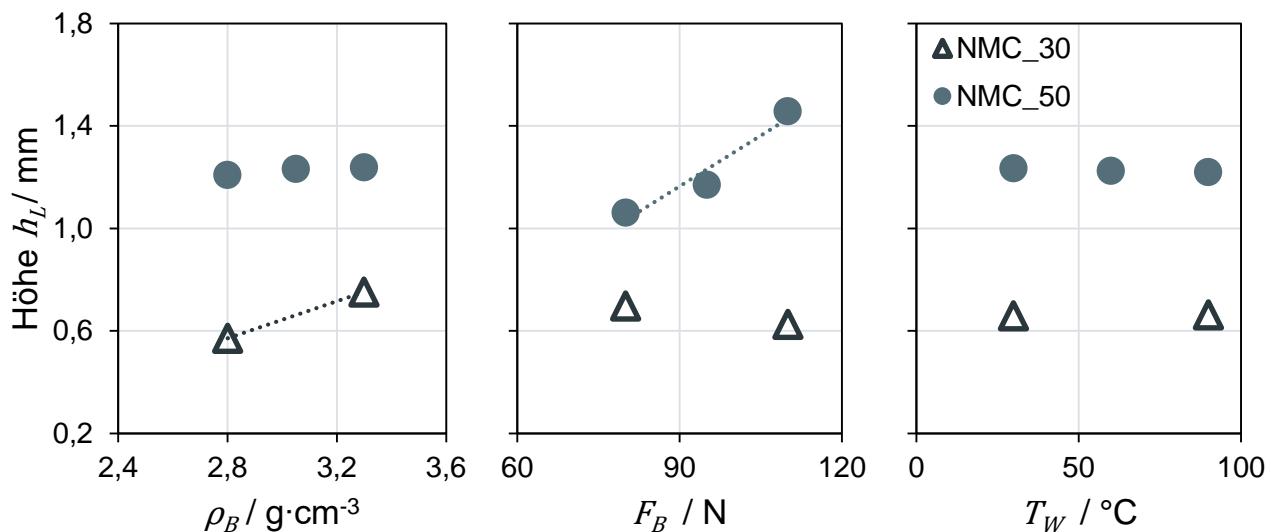


Abbildung 5-21 HE-Diagramm für die Längsfaltenhöhe für NMC_30 und NMC_50

Tabelle 5-12 zeigt das Verhältnis $h_L \cdot b_{Sub}^{-1}$ aus der Längsfaltenhöhe h_L bei der Breite des unbeschichteten Substrats b_{Sub} zur Breite des unbeschichteten Substrats.

Tabelle 5-12 Verhältnis aus der Höhe der Längsfalte $h_L(b_{Sub})$ bei der angegebenen unbeschichteten Substratbreite b_{Sub} und der angegebenen Substratbreite selbst (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)

b_{Sub} / mm	$h_L(b_{Sub}) / \text{mm}$	$h_L(b_{Sub}) \cdot b_{Sub}^{-1} / \%$
50	$h_L(50 \text{ mm})$	14,52
30	$h_L(30 \text{ mm})$	16,72

Es ist zu erkennen, dass ein bestimmtes Verhältnis zwischen Längsfaltenhöhe und Breite des unbeschichteten Substrats in etwa konstant gehalten wird. Dies erklärt, warum die Längsfalten bei einem größeren unbeschichteten Substratrand auch größer sind.

In Kapitel 5.1.5 wird gezeigt, dass die Reibung zwischen dem unbeschichteten Substrat und der Umlenkrolle größer ist als zwischen Beschichtung und Umlenkrolle. Der größere Anteil des unbeschichteten Substrats an der Gesamtelektrodenbreite führt also auch zu einer vergleichsweise größeren Reibung und zu einer größeren Gesamtbelastung der Elektrode. Eine größere Kompensation in Form einer höheren Längsfalte ist daher schlüssig.

(Wurba & Altmann et al. 2024, S. 502; Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5–6)

5.4.2 Breite der Längsfalte

Abbildung 5-22 zeigt das HE-Diagramm der Längsfaltenbreite für NMC_30 und NMC_50 im Vergleich.

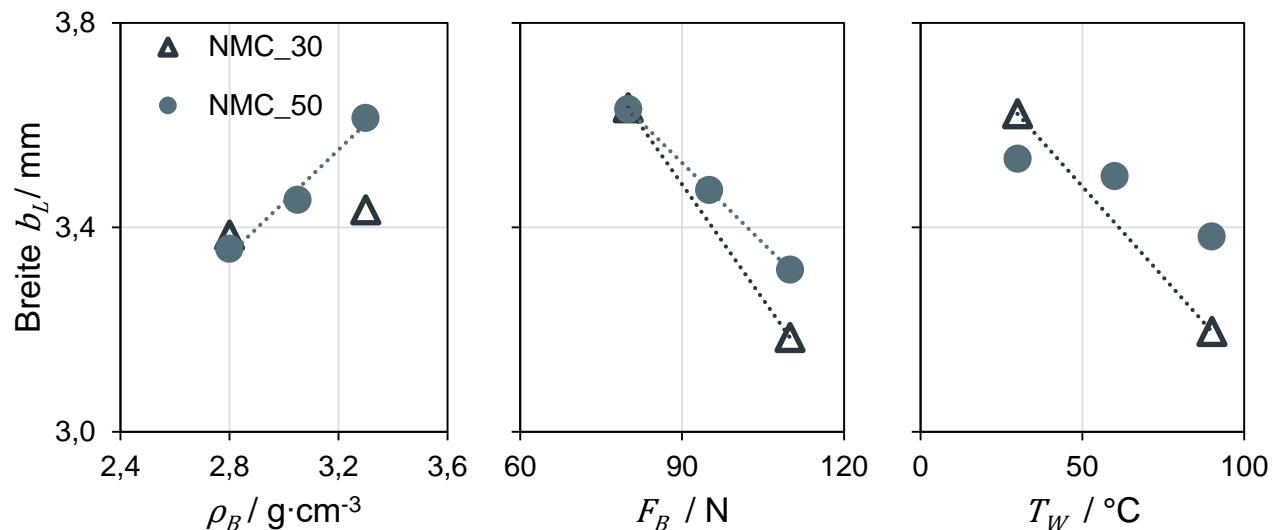


Abbildung 5-22 HE-Diagramm für die Längsfaltenbreite für NMC_30 und NMC_50

Im Gegensatz zur Höhe kann hier eindeutig festgestellt werden, dass der Bahnzug unabhängig von der Breite des unbeschichteten Substrats einen signifikanten negativen Einfluss auf die Breite der Längsfalte hat. Für NMC_30 gilt dabei $p = 0,0049$. Für die Dichte kann für NMC_30 kein signifikanter Effekt nachgewiesen werden. Der Faktor Temperatur hat mit $p = 0,059$ einen signifikanten negativen Effekt in NMC_30. Die gleiche nicht signifikante Tendenz wird in NMC_50 beobachtet, während sie in LFP

ebenfalls signifikant ist. Anders als für die Höhe ändert sich die Längsfaltenbreite bei einer Änderung der Breite des unbeschichteten Substrats lediglich um 1,89 %. Somit scheint sich die Längsfaltenbreite unabhängig von der Breite des unbeschichteten Substrats in einem stabilen Wertebereich einzupendeln und es ist nicht notwendig, das Verhältnis $b_L(b_{Sub}) \cdot b_{Sub}^{-1}$ zu berechnen.

(Wurba & Altmann et al. 2024, S. 502–503; Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5–6)

5.4.3 Distanz der Längsfalte zur Beschichtungskante

Aus dem HE-Diagramm für die Distanz zwischen Längsfalte und Beschichtungskante in Abbildung 5-23 kann entnommen werden, dass die Dichte für NMC_30 und NMC_50 für beide Kathoden signifikant ist. Dabei gilt $p = 0,0476$ für NMC_30. Die Richtungen sind für beide Kathoden jedoch unterschiedlich. Da das Beschichtungsmaterial gleich ist, muss in diesem Fall also die Breite des unbeschichteten Substrats von Bedeutung sein.

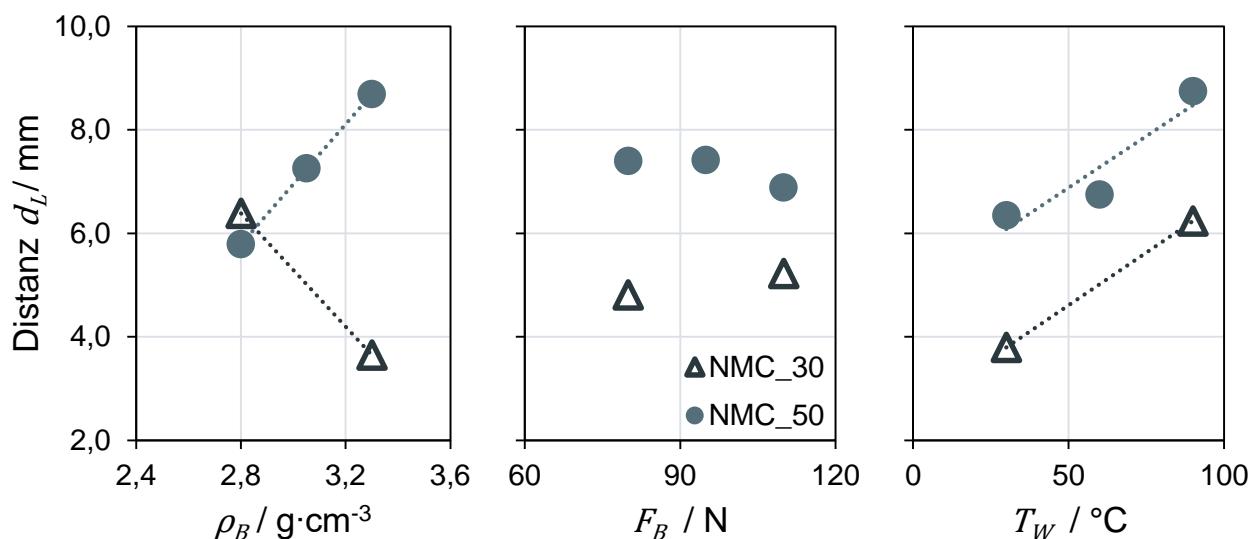


Abbildung 5-23 HE-Diagramm für die Längsfaltenbreite für NMC_30 und NMC_50

Die durchschnittliche Distanz über alle Versuche bei NMC_50 ist um 2,25 mm größer als bei NMC_30, was einer Steigerung von 44,81 % entspricht. Wird die unbeschichtete Substratbreite erhöht, so liegt der stabile Positionsreich der Längsfalte folglich weiter außen in Richtung der Außenkante der Elektrode. Diese These wird durch die in Tabelle 5-13 dargestellte Analyse der Verhältnisse von $d_L(b_{Sub}) \cdot b_{Sub}^{-1}$ analog zu $h_L(b_{Sub}) \cdot b_{Sub}^{-1}$ (vgl. Kapitel 5.4.1) gestützt. Ähnlich wie bei der Höhe der Längsfalte stellt sich eine in einem gewissen Wertebereich stabile Position ein, die das Verhältnis einhält.

Tabelle 5-13 Verhältnis aus der Distanz $d_L(b_{Sub})$ bei der angegebenen unbeschichteten Substratbreite b_{Sub} und der angegebenen Substratbreite selbst (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)

b_{Sub} / mm	$d_L(b_{Sub})$ / mm	$d_L(b_{Sub}) \cdot b_{Sub}^{-1}$ / %
50	$d(50\text{mm})$	2,45
30	$d_L(30\text{mm})$	2,20

Ein erweiterter Erklärungsansatz für die mit der Dichte sinkende Distanz in NMC_30 ergibt sich aus der Fläche der Längsfalte. Diese steigt für NMC_30 mit zunehmender Dichte, da die Höhe zunimmt, die Breite jedoch tendenziell konstant bleibt. Unter der Annahme, dass größere Längsfalten träger als kleinere Längsfalten sind, erscheint eine größere Längsfalte mit geringerer Distanz zur Beschichtungskante schlüssig. Wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, treiben die Eigenspannungen die Längsfalten nach außen, wie es für NMC_50 der Fall ist. Der beschriebene Effekt der Trägheit überlagert im beschichtungskantennahen Bereich die Eigenspannungen, sodass die Distanz in NMC_30 den diskutierten, negativen Zusammenhang zur Dichte zeigt. Der signifikante positive Einfluss der Temperatur mit $p = 0,0675$ wird analog zu NMC_50 in Kapitel 5.2.3 den Materialeigenschaften zugeordnet.

Obwohl für die Distanz signifikante Zusammenhänge gefunden werden, muss beachtet werden, dass die Längsfalten über ihren Lebenszyklus wandern. Die Falte bildet sich, bewegt sich zu einer stabilen Position und läuft nach einiger Zeit wieder aus. Die gezeigten Daten wurden alle innerhalb der stabilen Phase ausgewertet. Dennoch zeigen die repräsentativ in (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 505) dargestellten hohen Standardabweichungen der Versuchsreihe mit NMC_30, dass die Distanz auch innerhalb eines Versuchs stark variiert. Die Untersuchung der Länge der Längsfalten sollte Gegenstand zukünftiger Forschung sein. Das Wandern von Falten in Bahnen wird auch in (Jones 2021, S. 2) erwähnt, allerdings in Bezug auf ungenau ausgerichtete Umlenkrollen.

(Wurba & Altmann et al. 2024, S. 503; Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5–7)

5.4.4 Zwischenfazit

Die Längsfaltenhöhe scheint sich nach einem gewissen, in etwa konstanten Verhältnis aus der Längsfaltenhöhe und der Breite des unbeschichteten Substrats zu bilden. Das heißt, die Faltenhöhe nimmt mit steigender Breite des unbeschichteten Substrats zu.

Die für NMC_50 gefundenen signifikanten Einflussfaktoren können für NMC_30 aufgrund fehlender Signifikanzen für die entsprechenden Prozessparameter weder bestätigt noch widerlegt werden.

Die Breite der Längsfalte ändert sich durch die Erhöhung des Anteils des unbeschichteten Substrats kaum. Dafür kann der negative Effekt des Bahnzugs bestätigt werden.

Die Distanz stellt sich analog zur Höhe anhand des Verhältnisses zur unbeschichteten Substratbreite ein und steigt somit mit der Erhöhung des unbeschichteten Anteils an. Der positive Temperatureinfluss kann bestätigt werden. Der Einfluss der Dichte stimmt jedoch nicht überein.

Es kann also gezeigt werden, dass der Anteil des unbeschichteten Substrats an der Gesamtelektrode einen Einfluss auf die Geometrie der Längsfalte hat. Anhand der Erkenntnisse wird somit davon ausgegangen, dass die Längsfaltenbildung in Elektroden mit schmalem, unbeschichtetem Substrat ein geringeres Problem darstellt.

5.5 Resultierendes Material- und Prozessverständnis

Die Längsfalten werden maßgeblich durch die eingestellten Prozessparameter beeinflusst. Die geforderten hohen Dichten setzen eine hohe Verdichtung voraus, die zu Partikelverschiebungen und Eigenspannungen führen, welche wiederum Dehnungen in der Beschichtung hervorrufen. Weiter wird der beschichtete Teil der Elektrode gelängt, was die Deformation bzw. die Wellenbildung zur Folge hat. Die unter Eigenspannung stehende und deformierte Elektrode kann sich unter hohen Bahnzügen nicht entspannen, sondern schnürt zusätzlich ein. Beim Auftreffen auf die Umlenkrolle kann durch die aus Bahnzug und Reibung resultierende Klemmung keine Ausgleichsbewegung stattfinden und die Auslenkungen aus der xy-Ebene heraus sowie das Einschnüren der Elektrode werden durch die Bildung einer Längsfalte kompensiert. Eine Reduktion der gesamten Längsfalte über die Änderung der Prozessparameter ist nicht möglich.

Die Prozessparameter Dichte, Bahnzug und Temperatur haben teilweise gleiche und teilweise unterschiedliche Wirkungen auf die Geometrie der Längsfalten bei den verschiedenen Materialien. Dabei hat die Dichte den größten Einfluss. Sie führt bei einer Zunahme je nach Material zu einer Steigerung der Höhe und Breite bzw. zu einer Verstärkung der Längsfalte, da größere Deformationen und Eigenspannungen kompensiert werden müssen. Der Bahnzug zeigt dagegen durch die zunehmende Eigenspannung in Querrichtung eine reduzierende Wirkung auf die Breite, aber führt

gleichermaßen zu einer Zunahme der Höhe, da die Längsfalte bei der gleichen Kompen-sationsleistung zusammengeschoben wird. Die Temperatur kann die Breite der Längsfalte hingegen reduzieren, während die durch die Verdichtung entstehenden Eigenspannungen die Längsfalte nach außen treiben. Weiter ist ein deutlicher positiver Zusammenhang zwischen der Breite des unbeschichteten Substrats und der Höhe und Distanz zu vermerken. Die Breite der Längsfalte bleibt nahezu unverändert. Für den Einfluss der Materialgrößen auf die Längsfaltenbildung werden für beide Materialien keine übereinstimmenden Zusammenhänge gefunden. Die Auswirkung der Prozesspa-rameteränderungen auf die Dehnungen, die Biegesteifigkeit und die Amplitude der Wel-lenbildung stimmen jedoch größtenteils überein und sind dabei positiv.

6 Übertragbarkeit des Material- und Prozessverhaltens von LIB auf NIB

Dieses Kapitel ordnet die Material- und Prozesseigenschaften hinsichtlich der Längsfaltenbildung für HC-Anoden für NIB in den Kontext der LIB ein. Dazu werden die Ergebnisse der Versuche mit den HC-Anoden direkt mit den Erkenntnissen für LIB aus Kapitel 5 in Form der HE-Diagramme verglichen.

Die Rohdaten zu den in diesem Kapitel gezeigten Ergebnissen wurden im Rahmen der angeleiteten Abschlussarbeiten (A_Reusch 2023; A_Seiraffi 2024) erhoben.

6.1 Einfluss der Prozessparameter auf das Materialverhalten von NIB-Elektroden

Im Folgenden werden die bereits aus Kapitel 5 bekannten Materialgrößen für die HC-Anoden analysiert und mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 verglichen. Die gepunkteten Verbindungslienien dienen in diesem Kapitel lediglich der verbesserten Darstellung und haben darüber hinaus keine weitere Bedeutung. Die durchgezogenen Verbindungslienien bei den LIB-Kathoden zeigen hier eine Signifikanz an.

6.1.1 Dehnung

Ein Vergleich der x- und y-Dehnungen bei den verschiedenen HC-Anoden ist in Abbildung 6-1 zu sehen. In Kapitel 5.1.1 wurde bereits gezeigt, dass sich die Dehnungen für LFP_50 und NMC_50 kaum unterscheiden. Daher wird an dieser Stelle für eine übersichtlichere Darstellung auf die Datenpunkte von NMC_50 verzichtet.

Für die Anode HC_25_15_155 liegt aufgrund einer durch die geringe Materialmenge nicht wiederholbaren ungültigen Messung lediglich der Wert für die niedrigere Dichte vor. Es ist deutlich zu erkennen, dass die y-Dehnungen erwartungsgemäß größer sind als die x-Dehnungen. Weiter kann bestätigt werden, dass die Dichte ebenso wie bei den Kathoden für LIB einen positiven Einfluss auf die Dehnungen hat. Insgesamt sind die Dehnungen für alle HC-Anoden kleiner als für LFP. Dies könnte am wesentlich niedrigeren Flächengewicht des HC liegen, da sich dieses aufgrund der geringeren Materialmenge weniger dehnen kann. Dafür spricht auch, dass die Mittelwerte der Dehnungen von HC_20_15_155 niedriger ausfallen als die aller anderen HC-Anoden mit höherem Flächengewicht. Die Elektroden unterscheiden sich auch durch die Wahl des Binders. Spannungs-Dehnungskurven von reinen PVDF- und CMC/SBR-Filmen zeigen,

dass PVDF wesentlich größere Dehnungen als CMC/SBR aufnehmen kann (Li & Lewis et al. 2006, S. A19). Dies passt zu den größeren Dehnungen in den LIB-Kathoden, die mit PVDF gefertigt wurden.

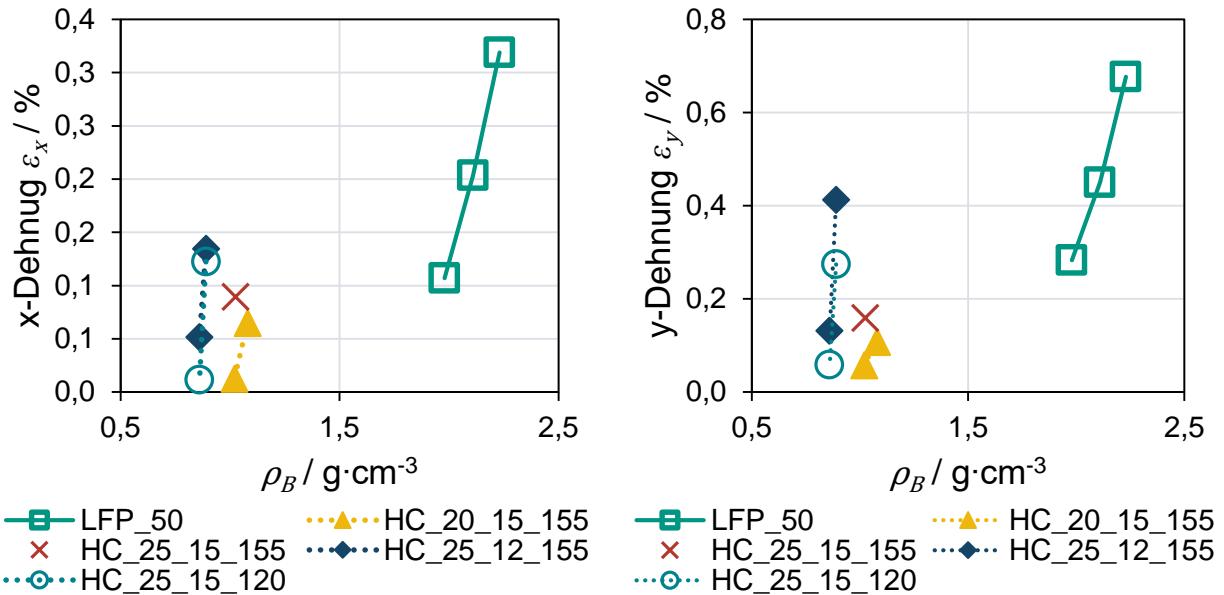


Abbildung 6-1 Vergleich der a) x-Dehnungen ε_x und b) y-Dehnungen ε_y zwischen LFP_50 und den Variationen des HC

6.1.2 Deformation

Für die niedrigen Dichtestufen sowie für die Anode mit dem geringeren Flächengewicht (HC_20_15_155) wird keine Welligkeit beobachtet. Stattdessen zeigt sich ein Ausbeulen. Um die Ergebnisse für die HC-Anoden vergleichen zu können, wird im Folgenden die maximale Auslenkung betrachtet. Abbildung 6-2 zeigt die maximalen Auslenkungen bei den HC-Anoden. Lediglich für HC_20_15_155 ist ein ausgeprägter positiver Einfluss der Dichte zu erkennen. (Günther 2023) beschreibt ebenfalls einen deutlichen Einfluss der Massenbeladung auf die Welligkeit bei einer Variation der Verdichtung. Allerdings nimmt die Wellenhöhe mit steigender Massenbeladung zu. Anders als hier beobachtet wird, steigt in (Günther 2023) die Wellenhöhe mit zunehmender Verdichtung für beide Massenbeladungen ähnlich schnell. (Günther 2023, S. 119–121) Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass die maximale Auslenkung und die Wellenhöhe lediglich eingeschränkt vergleichbar sind. Daher ist auch ein direkter Vergleich zwischen den LIB-Kathoden und den HC-Anoden an dieser Stelle nicht sinnvoll, da die gemittelten Amplituden nicht den maximalen Auslenkungen entsprechen. Dennoch zeigt sich für die maximale Auslenkung ein ähnlicher Trend wie für die Amplitude.

Während in (Günther 2023, S. 119) kein Einfluss der Substratdicke beobachtet wird, zeigt die maximale Auslenkung von HC_25_12_155 einen im Mittel größeren Wert als die anderen Anoden. Das dünneres Substrat bietet offenbar weniger Widerstand gegen Deformation.

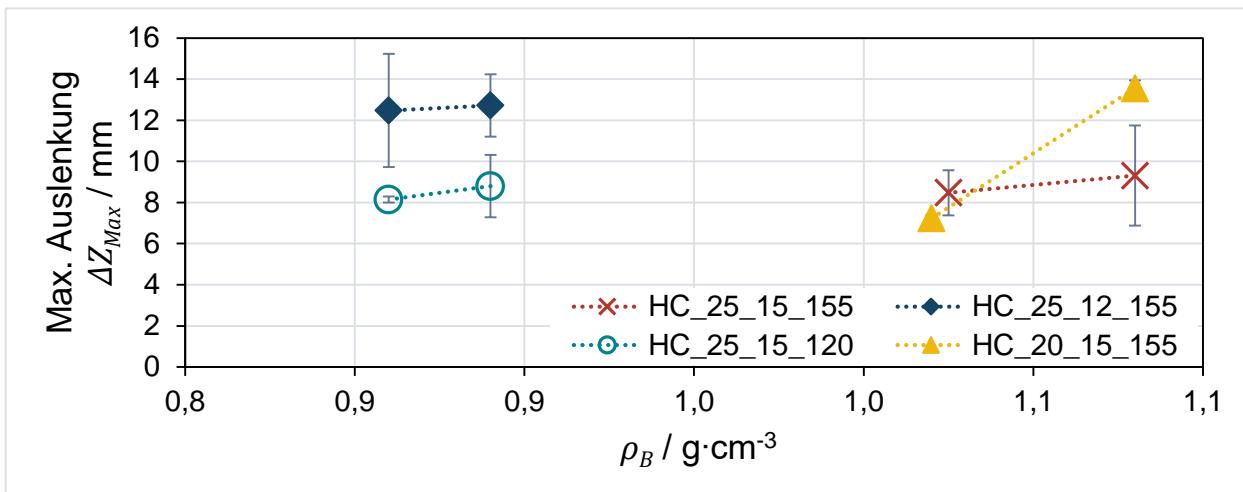


Abbildung 6-2 Vergleich der maximalen Auslenkung bei den HC-Anoden in Abhängigkeit der Dichte

6.1.3 Biegesteifigkeit

Auch für den Vergleich der breitenbezogenen Biegesteifigkeit wird in Abbildung 6-3 auf die Darstellung des NMC_50 verzichtet, da in Kapitel 5.1.3 gezeigt wird, dass sich die Biegesteifigkeiten für LFP_50 und NMC_50 ähneln. Anhand von Abbildung 6-3a) ist gut zu erkennen, dass die Biegesteifigkeit für alle HC-Anoden im kalandrierten Zustand abnimmt. Dies widerspricht den Erkenntnissen für die LIB-Kathoden aus Kapitel 5.1.3. Im unkalandrierten Zustand werden Brüche der Beschichtung an der Biegestelle beobachtet. Durch das Kalandrieren scheinen hier Bindungen im Material zu erweichen oder zerstört, statt stärker zu werden, wie es für die LIB-Kathoden der Fall ist. Dies liegt vermutlich an der Materialzusammensetzung. Möglicherweise brechen die CMC/SBR-Bindungen durch die Partikelverschiebungen aufgrund der in (Li & Lewis et al. 2006, S. A19) gezeigten größeren Sprödigkeit auf. Daher ist die Biegesteifigkeit im unkalandrierten Zustand für die HC-Anoden auch größer als für LFP_50. Dieser Effekt gilt jedoch nicht für HC_20_15_155, deren Biegesteifigkeit auch geringer als die der übrigen HC-Anoden ausfällt. Dies könnte zum einen an der geringeren Flächenbeladung und somit geringerem Widerstand gegen Biegung liegen. Andererseits war diese HC-Anode den Umgebungsbedingungen im kalandrierten Zustand wesentlich länger ausgesetzt als die übrigen HC-Anoden. Es könnte daher sein, dass sich die Beschaffenheit der

Beschichtung verändert hat. Im Rahmen dieser Arbeit ist der Einfluss der Umgebungsbedingungen jedoch nicht quantifizierbar. Die Werte der anderen HC-Anoden unterscheiden sich kaum.

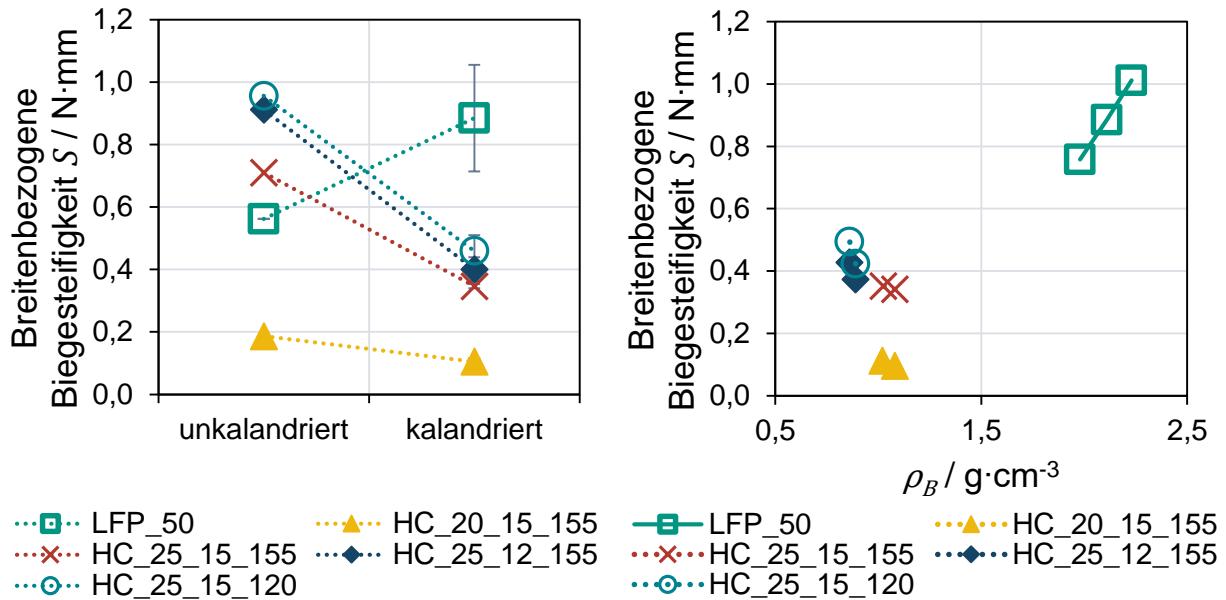


Abbildung 6-3 Vergleich der breitenbezogenen Biegesteifigkeit S zwischen LFP_50 und den Variationen des HC: a) Unterschied zwischen unkalandriert und kalandriert (Mittelwerte), b) Vergleich nach Dichten

Auch die Zunahme der Dichte sorgt im Gegensatz zu den LIB-Kathoden für einen weiteren Verlust der Biegesteifigkeit, auch wenn dieser vergleichsweise gering ausfällt (vgl. Abbildung 6-3b)). Der initiale Einbruch der Biegesteifigkeit wird bereits durch mäßiges Kalandrieren hervorgerufen. Ein verstifender Effekt durch die Eigenspannungen scheint hier anders als für die LIB-Kathoden nicht oder nur vernachlässigbar gering einzutreten. Möglicherweise hat auch die Partikelmorphologie einen Einfluss auf das unterschiedliche Biegeverhalten. Ähnlich wie für die Graphit-Anoden (vgl. Kapitel 2.4.4.1) könnten Abschermechanismen eintreten, die die Vernetzung der Partikel einschränken, wodurch ein verstifender Effekt ausbleibt. Die REM-Aufnahmen in Abbildung 4-4 lassen Delaminationen in allen HC-Anoden erkennen, die den Abfall der Biegesteifigkeit bei ausbleibender Versteifung begünstigen.

6.1.4 Adhäsion

Abbildung 6-4a) zeigt, dass die Haftkraft für die HC-Anoden im gemittelten kalandrierten Zustand gegenüber dem unkalandrierten Zustand steigt. Dies entspricht dem Verhalten von NMC_50. Die Haftkräfte liegen in einem ähnlichen Wertebereich wie

NMC_50 und unterscheiden sich dabei nur unwesentlich. Lediglich die Haftkraft für HC_25_12_155 fällt in beiden Zuständen geringer als für die übrigen HC-Anoden aus. Dies könnte an einer anderen Oberflächenbeschaffenheit des Substrats liegen, welche zu einem anderen Benetzungs- und Kontaktverhalten zwischen Beschichtung und Substrat führen kann. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass das dünnerne Substrat im 90 °-Schälversuch aufgrund des Versuchsaufbaus einen geringeren Widerstand gegen die Biegung um 90 ° an der Abschälstelle aufweist und daher eine geringere Haftkraft gemessen wird. Anhand der Biegesteifigkeit in Kapitel 6.1.3 kann dieser Effekt jedoch nicht belegt werden. Hinzu kommen die Risse in der Beschichtung, die in den REM-Aufnahmen in Abbildung 4-4 im kalandrierten wie unkalandrierten Zustand zu erkennen sind. Die REM-Aufnahmen zeigen nur punktuelle Ausschnitte der gesamten Elektrode. Daher wird vermutet, dass sich in allen HC-Anoden Risse in beiden Zuständen befinden. Aufgrund des Anstiegs der breitenbezogenen Haftkraft ist davon auszugehen, dass sich einige Risse, die im unkalandrierten Zustand bereits vorhanden waren, durch das Kalandrieren wieder schließen. Gleichermassen entstehen durch die Scherkräfte neue Risse, die einen erneuten Abfall der breitenbezogenen Haftkraft je nach Häufung und Ausmaß begünstigen können. Die im Rahmen dieser Untersuchungen aufgezeichneten Daten reichen jedoch nicht aus, um die Rissverteilung in den HC-Anoden weiter zu quantifizieren.

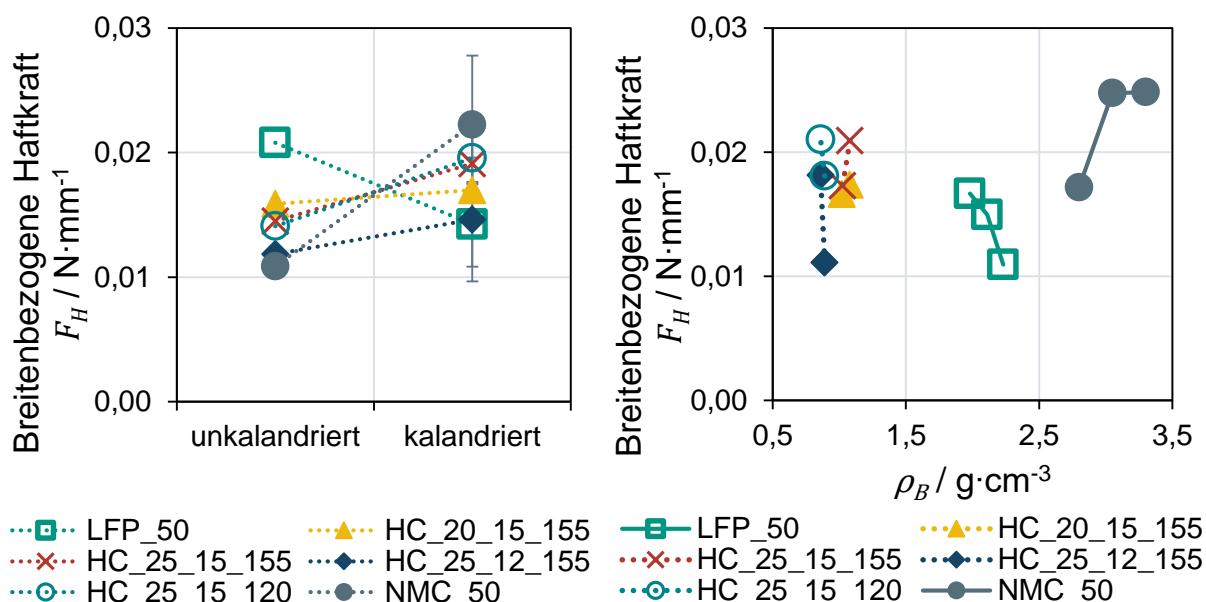


Abbildung 6-4 Vergleich der breitenbezogenen Haftkraft F_H zwischen LFP_50 und den Variationen des HC: a) Unterschied zwischen unkalandriert und kalandriert (Mittelwerte), b) Vergleich nach Dichten

Proben der abgeschälten Substrate werden nachträglich unter dem Lichtmikroskop Olympus BX53M vergrößert. Abbildung 6-5a) zeigt beispielhaft eine Aufnahme bei 2,5-facher Vergrößerung.

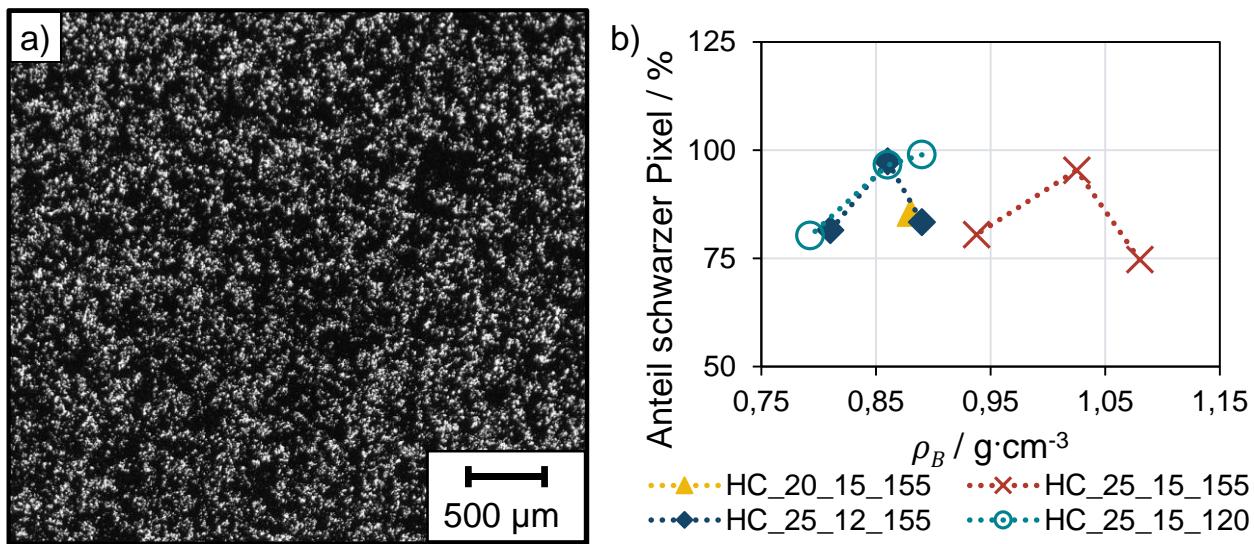


Abbildung 6-5 a) Exemplarische lichtmikroskopische Aufnahme bei 2,5-facher Vergrößerung, b) Anteil der schwarzen Pixel

Die Aufnahmen werden einer automatisierten Binarisierung mit festem Schwellwert in MATLAB unterzogen. So kann der Anteil der schwarzen Pixel berechnet werden, der dem Anteil verbliebener Partikel auf dem Substrat entspricht. Abbildung 6-5b) zeigt die Ergebnisse, wobei die Messwerte mit der niedrigsten Dichte den unkalandrierten Proben entsprechen. Aus den Substraten von HC_20_15_155 kann lediglich eine unkalandrierte Probe entnommen werden, da die kalandrierten Substrate zu stark beschädigt sind. Die übrigen Anoden zeigen zunächst einen Anstieg der verbliebenen Partikel bei der niedrigeren Verdichtung, wobei zwischen den Variationen kein Unterschied zu erkennen ist. Lediglich der unkalandrierte Wert von HC_20_15_155 ist leicht erhöht. Im Hinblick auf den Einfluss der Dichte (vgl. Abbildung 6-4b)) ist für HC_25_15_155 durch die zunehmende Haftkraft bei gleichzeitig sinkendem Anteil der Partikel auf dem Substrat von einer starken Kohäsion auszugehen. In der zugehörigen REM-Aufnahme in Abbildung 4-4 ist eine minimale Verankerung der eingedrückten Partikel zu erkennen, die für eine Zunahme der Adhäsion sorgt. Für HC_25_15_120 ist ein Abfall der Haftkraft zu vermerken, bei gleichzeitiger Zunahme der verbliebenen Partikel, was auf eine Schwächung der Kohäsion hindeutet, die möglicherweise auch unter die Adhäsionskraft fällt und somit den sinkenden Haftkraftbetrag erklärt. Die entsprechende REM-Aufnahme in Abbildung 4-4 bestätigt diese Vermutung anhand des Risses durch die

Beschichtung. Die Haftkraft für HC_25_12_155 fällt ebenfalls, jedoch sinkt auch der Anteil der verbliebenen Partikel. Das bedeutet, die Kohäsion nimmt deutlich zu und übersteigt auch die Adhäsionskraft. Die sinkende Haftkraft könnte ihre Ursache auch in der möglicherweise unterschiedlichen Substratbeschaffenheit haben. Die HC-Anode mit dem geringeren Flächengewicht wird durch den Kalandriergrad kaum beeinflusst. HC_25_15_120 und HC_25_15_155 sollten sich hinsichtlich des Einflusses der Dichte eigentlich gleich verhalten, da lediglich das Format unterschiedlich ist. Abbildung 6-4a) bestätigt diese Erwartung für die gemittelten Werte. Obwohl darauf geachtet wurde, unbeschädigte Proben zu testen, ist es naheliegend, dass die Beschichtungsfehler hier eine größere Rolle spielen und zu Unregelmäßigkeiten führen. Dennoch zeigen auch NMC_50 und LFP_50 unterschiedliche, aber trotzdem signifikante Dichtezusammenhänge.

Durchschnittlich betrachtet steigt die Haftkraft durch das Kalandrieren. Anhand des im Mittel zunehmenden Anteils der verbliebenen Partikel im kalandrierten Zustand kann demzufolge von einer verbesserten Verankerung der Partikel und einem Verschließen der im unkalandrierten Zustand vorhandenen Delaminationen ausgegangen werden.

6.1.5 Zwischenfazit

Abbildung 6-6 zeigt zusammenfassend die Übertragbarkeit der Erkenntnisse für die LIB-Kathoden auf die Materialeigenschaften der HC-Anoden. Zunächst fällt auf, dass die HC-Anoden überwiegend keine ausgeprägte Welligkeit, sondern ein Ausbeulen zeigen, weshalb der Wissenstransfer hier nicht direkt möglich ist. Gleiches gilt für die breitenbezogene Biegesteifigkeit, die im Gegensatz zu den LIB-Kathoden für eine zunehmende Dichte tendenziell eher fällt. Im Vergleich zu den LIB-Kathoden ist die breitenbezogene Biegesteifigkeit im kalandrierten Zustand außerdem wesentlich niedriger. Die Dehnungen verhalten sich analog zu den LIB-Kathoden, wobei diese für die HC-Anoden ebenfalls geringer ausfallen. Ein Teil der untersuchten HC-Anoden zeigt bezüglich der Adhäsion ein ähnliches Verhalten wie die LFP-Kathoden, während der andere Teil ein mit den NMC-Kathoden vergleichbares Verhalten aufweist. Ein Wissenstransfer ist hier daher nur eingeschränkt möglich. Die Stärke der Adhäsion liegt in einem ähnlichen Bereich wie die der LIB-Kathoden.

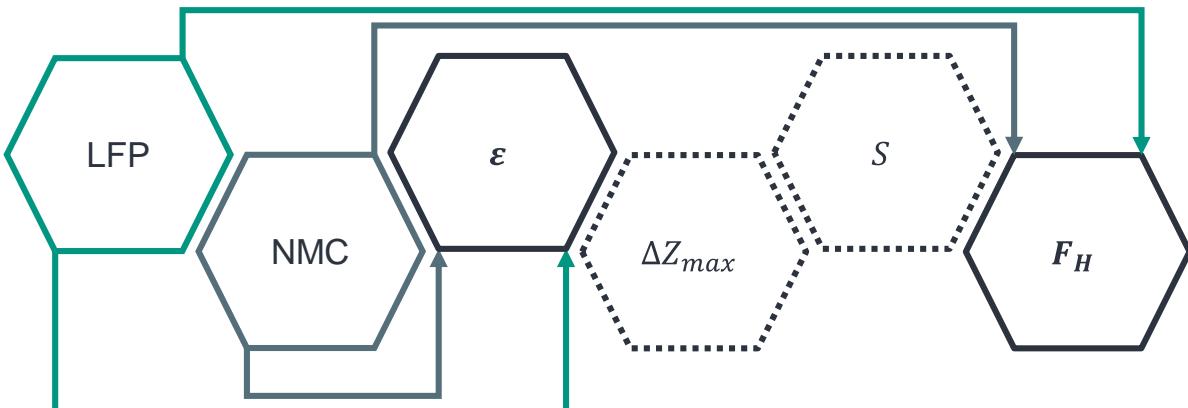


Abbildung 6-6 Überblick über die Übertragbarkeit der Materialeigenschaften der NMC_50- (grau) und LFP_50-Kathoden (grün) auf die Materialeigenschaften der HC-Anoden (schwarz)

6.2 Längsfalten bei Hard Carbon Anoden für NIB

In diesem Kapitel wird ein Vergleich zwischen der Geometrie der Längsfalten in den HC-Anoden mit der Geometrie der Längsfalten in den LIB-Kathoden aus Kapitel 5 gezogen.

6.2.1 Höhe der Längsfalte

Abbildung 6-7 zeigt die Höhe der Längsfalten der einzelnen Versuche mit den HC-Anoden im Vergleich zu den Ergebnissen für die LIB-Kathoden.

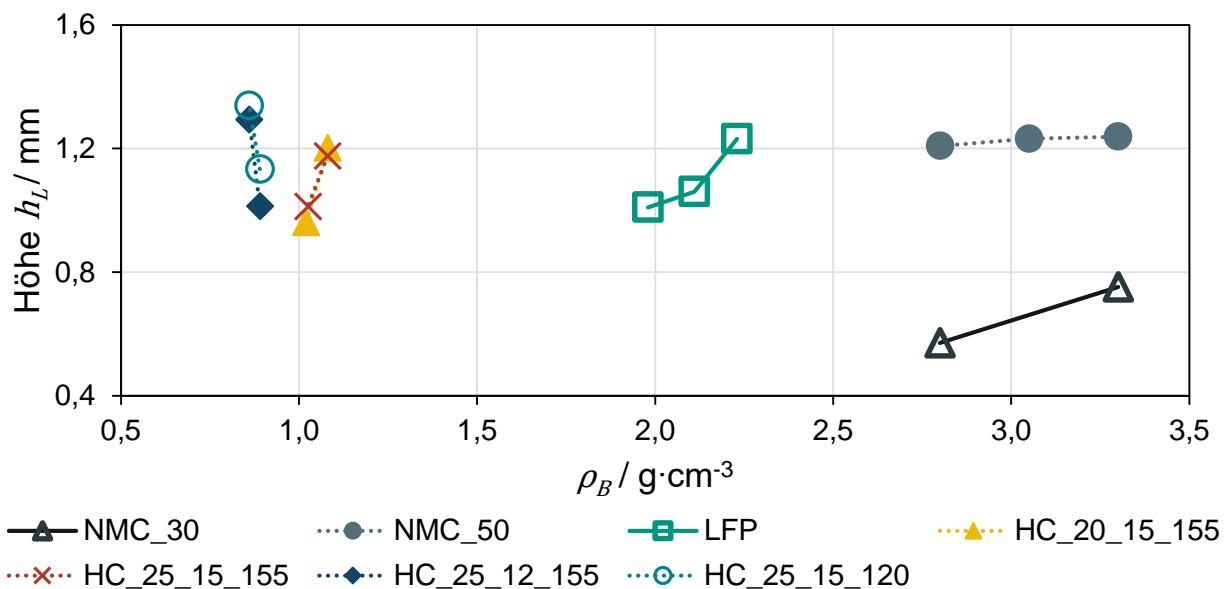


Abbildung 6-7 Vergleich der Höhe der Längsfalten zwischen allen Elektroden

Alle Höhenwerte finden sich in einem ähnlichen Spektrum wieder. Insbesondere zwischen HC_20_15_155 und HC_25_15_155 ist nahezu kein Unterschied erkennbar,

was darauf hindeutet, dass das Flächengewicht gegenüber einer sonst gleichen HC-Anode keinen Einfluss hat. Weiter hat auch die abnehmende Dicke des Substrats gegenüber der Referenz (HC_25_15_155) nur einen sehr geringen positiven Einfluss. Die größte Änderung der Mittelwerte mit einer Zunahme von 13,0 % wird bei einer Steigerung des Anteils des unbeschichteten Substrats um 32,7 % beobachtet. Diese Tendenz entspricht auch der bereits in Kapitel 5.4.1 dargestellten Zunahme der Faltenhöhe bei größerem unbeschichtetem Substrat bei NMC811. Die Zunahme beträgt hier allerdings 85,46 % bei einer Steigerung des unbeschichteten Substratanteils um 40,5 %.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Längsfaltenhöhe der HC-Anoden mit niedrigeren Dichten durch die Dichtesteigerung negativ beeinflusst wird, während bei den höheren Dichten Umgekehrtes der Fall ist. Dabei sind die Änderungen innerhalb der Dichtestufen betragsmäßig ähnlich und > 15 %. Die HC-Anode mit dem geringsten Flächengewicht HC_20_15_155 sowie die Referenz HC_25_15_155 entsprechen den Erkenntnissen aus den Versuchen mit LFP_50 und NMC_30, bei denen eine zunehmende Dichte für eine Zunahme der Höhe der Längsfalte sorgt. Da die beiden Anoden HC_25_12_155 und HC_25_15_120 bereits im unkalandrierten Zustand andere Dichten aufweisen, könnte dies die Ursache für das unterschiedliche Verhalten sein. Es ist weiter zu vermuten, dass die Unterschiede auch aus der Verwendung der beiden verschiedenen Chargen der HC-Partikel entstanden sein können.

6.2.2 Breite der Längsfalte

Wie in Abbildung 6-8 zu erkennen ist, befinden sich die Werte der Längsfaltenbreite insgesamt in einem ähnlichen Bereich. Mit Ausnahme von HC_25_15_120 sinken die Mittelwerte der Breite gegenüber der Referenz (HC_25_15_155) deutlich. Der größere Anteil des unbeschichteten Substrats scheint keinen Einfluss auf die mittlere Längsfaltenbreite zu haben. Dies entspricht den Erkenntnissen, welche bereits für NMC811 gefunden wurden. Den größten negativen Einfluss scheint das geringere Flächengewicht (HC_20_15_155) zu haben. Die Falten bilden sich also schmäler aus. Den betragsmäßig nächstgrößeren negativen Effekt zeigt das dünnere Substrat. Möglicherweise kann sich das dünnere Substrat besser an die Umlenkrolle anschmiegen und benötigt eine geringere Kompensation.

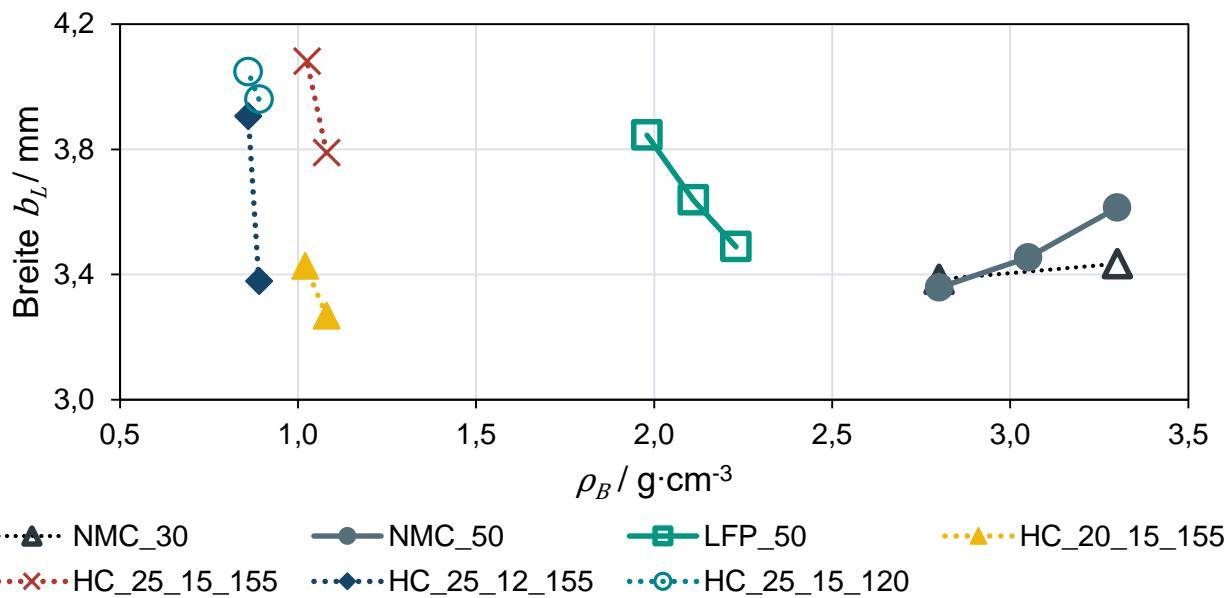


Abbildung 6-8 Vergleich der Breite der Längsfalte zwischen allen Elektroden

Abgesehen von HC_25_12_155 mit einer Abnahme von 13,5 % scheint die Dichteänderung lediglich einen geringen negativen Effekt auf die Längsfaltenbreite zu haben. Daher wird angenommen, dass die dünneren Substratfolie sensibler gegenüber Dichteänderungen ist. Das dünneren Substrat bietet bei größeren Verformungen durch die Dichtesteigerungen einen geringeren Widerstand und wölbt sich daher schmäler auf. Auch für LFP_50 kann ein negativer Effekt der Dichte auf die Längsfaltenbreite beobachtet werden. Bezuglich LFP sind die Erkenntnisse daher übertragbar.

6.2.3 Distanz der Längsfalte zur Beschichtungskante

Aus Abbildung 6-9 wird deutlich, dass der größere Anteil des unbeschichteten Substrats für eine um 74,17 % größere Distanz im Gegensatz zur Referenz (HC_25_15_155) sorgt. Dies passt auch zu den Erkenntnissen bei den NMC811-Kathoden (vgl. Kapitel 5.4.3). Weiter nimmt die Distanz für HC_25_15_120 mit zunehmender Dichte um 18,37 % zu. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen für NMC_50 und LFP_50, bei denen die Distanz mit steigender Dichte auch zunimmt. Ab einer gewissen Breite des unbeschichteten Substrats überwinden die nach außen wirkenden Eigenspannungen, die die x-Dehnungen hervorrufen, die Trägheit und treiben die Falte nach außen. Der Mittelwert des dünneren Substrats ist nur minimal größer als der der Referenz. Dies ist aufgrund der bereits für NMC_30 diskutierten Trägheit zu erwarten, denn die approximierte Längsfaltenfläche entspricht nahezu der Fläche von HC_25_15_155, wie in Abbildung 6-10 zu erkennen ist.

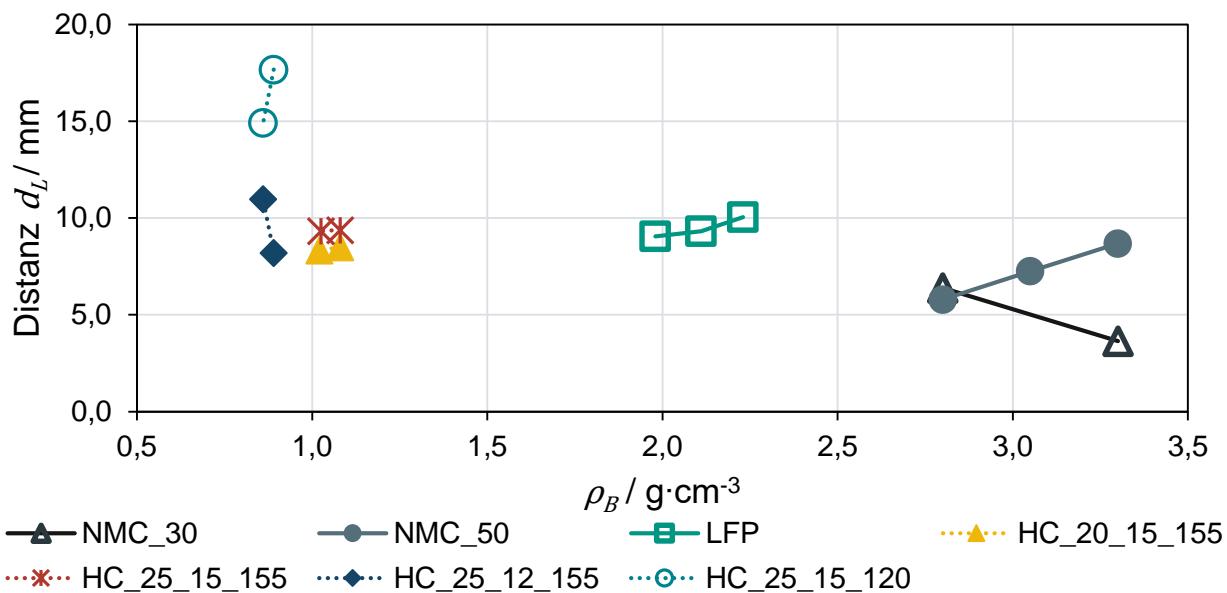


Abbildung 6-9 Vergleich der Distanz der Längsfalte zur Beschichtungskante zwischen allen Elektroden

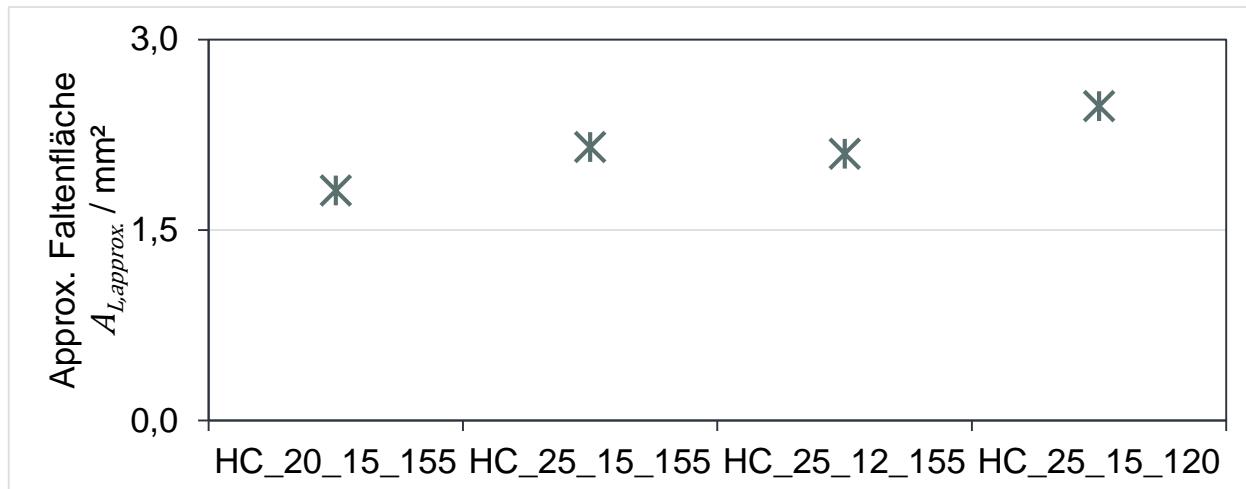


Abbildung 6-10 Approximierte Faltenfläche $A_{L,approx.}$.

Die Dichteabhängigkeit von HC_25_12_155 ist mit einer Abnahme von 25,2 % deutlich ausgeprägt. Im Gegensatz dazu zeigen HC_20_15_155 und HC_25_15_155 nahezu keinen Einfluss der Dichte. Das geringere Flächengewicht sorgt für eine Falte, die im Vergleich zur Referenz um durchschnittlich 10,06 % näher am Beschichtungsrand positioniert ist. Aufgrund der geringeren approximierten Längsfaltenfläche bei HC_20_15_155 im Vergleich zur Referenz wäre eigentlich zu erwarten, dass die Distanz durch die geringere Trägheit größer ist. Jedoch ist zu beachten, dass die Standardabweichungen der Distanzen von HC_25_15_155 und HC_20_15_155 mit ca.

1,8 - 2,2 mm groß sind und die Mittelwerte somit ineinander liegen. Demnach kann keine eindeutige Aussage getroffen werden.

Bei den Versuchen mit den HC-Anoden werden zusätzliche Längsfalten beobachtet, die sich weiter außen auf dem unbeschichteten Substrat bilden. Da diese außerhalb des Messbereichs der Lasersensoren liegen, können keine Daten aufgezeichnet werden. Außerdem kann für das Auftreten der äußeren Falten innerhalb des Versuchsräums keine Systematik beobachtet werden.

6.2.4 Einfluss des Materialverhaltens auf die Geometrie der Längsfalte

Anders als für die LIB-Kathoden in Kapitel 5 kann die Korrelation hier nicht mit Pearson-Korrelationskoeffizienten durchgeführt werden, da zwei Punkte nicht ausreichen, um die Stärke eines linearen Zusammenhangs zu bewerten. Eine Untersuchung kann daher nur anhand der HE-Diagramme erfolgen.

Abbildung 6-11 zeigt exemplarisch den Einfluss der breitenbezogenen Biegesteifigkeit auf die Geometrie der Längsfalte. Dieser folgt dem umgekehrten Einfluss der Dichte auf die Geometrie (vgl. Abbildung 6-7, Abbildung 6-8, Abbildung 6-9), da für die breitenbezogene Biegesteifigkeit eine negative Abhängigkeit zur Dichte gefunden wird (vgl. Abbildung 6-3). Beispielsweise hat also eine hohe Dichte in HC_20_15_155 eine niedrigere Biegesteifigkeit und höhere Längsfalte zu Folge, während eine niedrige Biegesteifigkeit zu einer höheren Längsfalte führt.

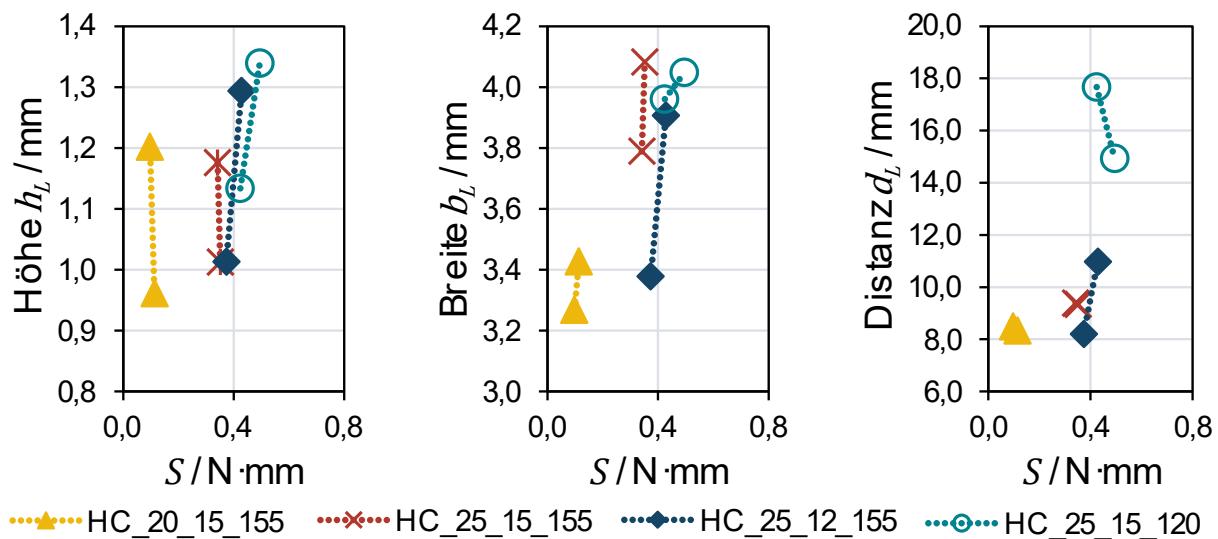


Abbildung 6-11 Einfluss der breitenbezogenen Biegesteifigkeit S auf die Geometrie der Längsfalte

Der Einfluss der Prozessparameter auf die Materialeigenschaften und die Geometrie der Längsfalten spiegelt sich also direkt in der Beziehung zwischen den Materialeigenschaften und der Geometrie wider. Da keine Aussagen zur Stärke der Beziehung gemacht werden können, wird im Folgenden auf eine weitere Ausführung verzichtet und für die Diagramme zu den übrigen Materialgrößen auf den Anhang verwiesen.

6.2.5 Zwischenfazit

Die Aussagekraft der Untersuchungen an den HC-Anoden ist durch die beschränkte Datenlage limitiert. Tabelle 6-1 zeigt den Einfluss der Dichtesteigerung auf die Geometrie der Längsfalten. Dabei werden Änderungen von > 15 % bzw. < -15 % als +1 bzw. -1 und dazwischen als 0 codiert.

Tabelle 6-1 Überblick über den Einfluss der Dichtesteigerung auf die Längsfaltengeometrie codiert als +1 (> 15 %), 0 und -1 (< -15 %) und Übereinstimmung mit LIB, sofern vorhanden

	Höhe	Breite	Distanz
HC_25_15_155	+1 LFP_50, NMC_30	0 NMC_30	0 -
HC_20_15_155	+1 LFP_50, NMC_30	0 NMC_30	0 -
HC_25_12_155	-1 -	0 NMC_30	-1 NMC_30
HC_25_15_120	-1 -	0 NMC_30	+1 NMC_50, LFP_50

Die Variation der Dichte zeigt für die Höhe der Längsfalte einen negativen Einfluss auf die Anoden mit dünnerem Substrat und größerem unbeschichteten Substratanteil. Analog zu den untersuchten LIB-Kathoden wird jedoch ein positiver Einfluss auf die Referenzanode und die Anode mit geringerer Flächenbeladung beobachtet. Für die Breite kann wie für NMC_30 keine betragsmäßige Änderung > 15 % bei einer Dichteänderung beobachtet werden. Für die Distanz hingegen wird ein negativer Zusammenhang für die HC-Anode mit dem dünneren Substrat gefunden, was auch für NMC_30 der Fall ist. Die Dichteänderung zeigt zuletzt für HC_25_15_120 einen positiven Einfluss, was auch für NMC_50 und LFP_50 gefunden wurde.

Ein direkter Wissenstransfer für die Geometrie der Längsfalte ist daher teilweise möglich.

Wie analog aus Tabelle 6-2 zu entnehmen ist, haben die Eigenschaften der HC-Anoden keinen Einfluss, der größer als $\pm 15\%$ ist. Eine Ausnahme bildet die HC-Anode mit dem größeren Substratanteil, die für die Distanz analog zu NMC811 eine Zunahme zeigt.

Tabelle 6-2 Überblick über den Einfluss der Anodeneigenschaften im Vergleich zur Referenz (HC_25_15_155) auf die Längsfaltengeometrie codiert als +1 (> 15 %), 0 und -1 (< 15 %)

Eigenschaften	Höhe	Breite	Distanz
Flächengewicht	0	0	0
Dicke Substrat	0	0	0
Anteil unbeschichtetes Substrat	0	0	+1

Zuletzt wird gezeigt, dass die Längsfaltenbildung erst ab einer gewissen, materialindividuellen Dichte bzw. Verdichtung einsetzt.

7 Materialunabhängige Vorrichtung zur Reduktion der Längsfaltenbildung

Aus den Kapiteln 5 und 6 wird deutlich, dass die Längsfaltenbildung unter den gegebenen Anforderungen (hohe Dichte, hoher Bahnzug) durch das Verändern der Prozessparameter nicht verhindert werden kann. Dies gilt für alle untersuchten Elektroden und daher unabhängig von der Materialzusammensetzung. Daher muss eine zusätzliche Vorrichtung integriert werden, die so in den Prozess eingreift, dass die Längsfaltenbildung unter den geforderten Prozessbedingungen verhindert bzw. zumindest reduziert wird. Im Folgenden wird daher die Entwicklung und Umsetzung von zwei Konzepten zur Reduktion der Längsfaltenbildung gezeigt. Beide Konzepte werden anschließend validiert.

7.1 Konzeptentwicklung und Umsetzung

Die Konzeptentwicklung und Umsetzung erfolgten im Rahmen der angeleiteten Abschlussarbeiten (A_Bauer 2023; A_Seiraffi 2024) und wurde in (Wurba & Bauer et al. 2024) veröffentlicht.

7.1.1 Randbedingungen und Anforderungen

Das betrachtete System umfasst den in Kapitel 4.1.1 eingeführten Kalander GKL 500 MS (Saueressig Group) (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 2). Wie bereits in Kapitel 4.1.3 beschrieben, bilden sich die Längsfalten an der ersten Umlenkrolle nach dem Kalandrieren aus.

Die erforderliche Vorrichtung soll die Längsfaltenbildung mindestens reduzieren, um für den Zellbau einwandfreie Elektroden zu erhalten. Dementsprechend sollte insbesondere die Höhe der Längsfalten minimiert werden. Eine Reduktion der Breite in Kombination mit einer Höhenreduktion ist ebenfalls wünschenswert. Die Position der Längsfalte sollte möglichst nah am Beschichtungsrand sein, um das Verschweißen der Ableiterfahnen nicht zu beeinträchtigen, oder sich so weit außerhalb befinden, dass sie bei der Vereinzelung mit abgetrennt wird. Für die weitere Handhabung und Führung der Elektrodenbahn sind die durch die Längsfalten induzierten Bahnrisse ausschlaggebend. Auch hier vermindert eine Reduktion der Längsfaltenhöhe die Kerbwirkung und das Bahnrißrisiko sinkt. Idealerweise wird die Bildung der Längsfalte jedoch vollständig verhindert.

Weiter darf die empfindliche Elektrode nicht beschädigt werden und die Bildung anderer Defekte oder Bahnrisse aufgrund der zusätzlichen Vorrichtung soll ausgeschlossen sein. Der Bauraum ergibt sich aus dem Aufbau des Zugwerks des Kalanders. Die Umlenkrollen sind in einer Stahl-Ständerung fest gelagert. Die Elektrode wird bis zur ersten Umlenkrolle gerade aus dem Walzwerk herausgeführt und anschließend S-förmig umgelenkt. Wie in Abbildung 4-5 gezeigt, bildet sich die Längsfalte unmittelbar beim Auftreffen auf die Umlenkrolle, wobei die Bildungszone schon einige Zentimeter früher beginnt. Die zusätzliche Vorrichtung muss also so nah wie möglich an der Umlenkrolle angebracht werden. Die Vorrichtung sollte zudem möglichst kompakt sein, um die Zugänglichkeit und den Bauraum für weitere Sensorik nicht einzuschränken. Zukünftig ist es wünschenswert, Elektroden mit verschiedenen Abmessungen verarbeiten zu können, weshalb die Vorrichtung in ihrer Position möglichst flexibel sein soll. Da es sich in dieser frühen Entwicklungsphase um einen Prototyp handelt, welcher dazu dient, Erkenntnisse zu gewinnen, um Handlungsmaßnahmen ableiten zu können, ist es notwendig, die Konstruktion möglichst einfach zu halten. Dabei müssen die entscheidenden Komponenten einfach montier- und demontierbar sein. Außerdem soll eine gewisse Adaptierbarkeit gegeben sein. Hinsichtlich der Komplexität der Steuerung des Systems gilt es, diese so gering wie möglich zu halten, um schnell und einfach zu Erkenntnissen zu gelangen. Im ersten Schritt werden ausschließlich Elektroden mit beidseitig gleichem unbeschichteten Substratrand betrachtet. Für eine gleichmäßige Krafteinbringung und um die Ausrichtung der Bahn nicht zu verändern, soll der Aufbau daher symmetrisch sein. (A_Bauer 2023, S. 31–34; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 2)

Zusätzlich ist aus Vorversuchen bekannt, dass die Längsfaltenbildung manuell unterbunden werden kann. Wird die laufende Elektrode kurz vor dem Auftreffen auf die Umlenkrolle am unbeschichteten Substratrand mit den Fingern festgehalten und dabei kräftig in x-Richtung gezogen, so trifft sie gestreckt und flach auf die Umlenkrolle. Eine Längsfalte kann sich somit nicht ausbilden. Bleibt diese manuelle Streckung aus, so bildet sich die Längsfalte erneut. Diese Erkenntnisse sollen für die Auslegung der Konzepte berücksichtigt werden.

7.1.2 Funktionenstruktur und Prinziplösungen

Aus den Vorversuchen ergibt sich die Forderung nach dem Aufbringen einer Kraft F_{str} , welche ausreicht, um eine Streckung der Bahn in x-Richtung zu erzielen. Dies wird als erste Hauptfunktion definiert. Wie in Abbildung 5-14 dargestellt, wird diese Streckkraft

über den unbeschichteten Substratrand eingebracht, um die Beschichtung nicht zu beschädigen. Dabei muss die in Abbildung 5-14 angedeutete Flächenpressung infolge der Kraft F_{FP} überwunden werden. Die zweite Hauptfunktion soll die Elektrode so führen, dass sie möglichst eben auf die Umlenkrolle trifft, sodass ein vollständiges Anschmiegen der deformierten Elektrode an die Umlenkrolle möglich ist. (A_Bauer 2023, S. 36; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 2)

Im Folgenden werden die Funktionen des Systems mithilfe der Funktionen-Analyse-Systemtechnik (FAST) nach (*VDI 2803 - Function analysis - Fundamentals and method* 2019, S. 16) in einem sogenannten FAST-Diagramm dargestellt. Das Gesamtsystem beinhaltet das Verdichten und das Umlenken der Elektrode. Dazwischen muss die Vorrichtung integriert werden, welche in Abbildung 7-1 durch den gestrichelten Rahmen markiert ist. Sie muss die mechanische Energie liefern und auf die Elektrode übertragen, um eine Streckkraft aufzubringen und die Elektrode zu führen.

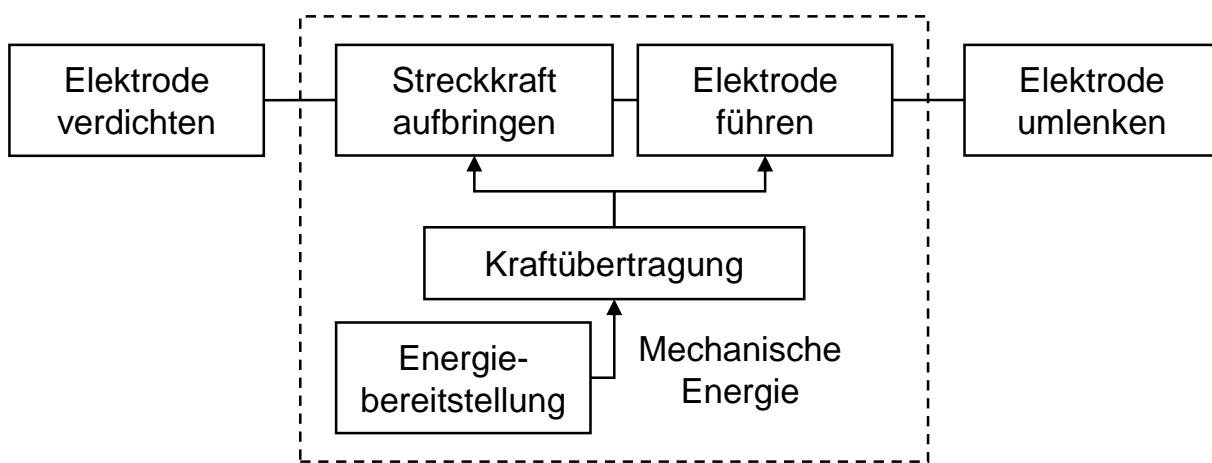


Abbildung 7-1 FAST-Diagramm basierend auf (A_Bauer 2023, S. 36; Naefe 2018, S. 95–97; VDI 2803 - Function analysis - Fundamentals and method 2019, S. 16)

Die Kraft kann prinzipiell form- oder kraftschlüssig übertragen werden, wobei dies kontinuierlich oder diskontinuierlich erfolgen kann. Eine Kraftübertragung über elektromagnetische Felder wird als Wirkprinzip verworfen, da Al und Cu nicht magnetisch sind (Hornbogen & Warlimont et al. 2019, S. 328).

Wie aus Kapitel 2.6 hervorgeht, werden in der Bahnverarbeitung überwiegend Rollen für einen kontinuierlichen Betrieb eingesetzt. Abbildung 7-2a) zeigt, dass die Kraft formschlüssig durch das Andrücken einer drehbar gelagerten Rolle aufgebracht werden kann. Dies wird beispielsweise zur Führung der Bahn genutzt. Weiter kann eine schräg angestellte, mitdrehende Rolle kraftschlüssig durch Reibung eine nach außen wirkende Kraft erzeugen. Diese Möglichkeit ist in Abbildung 7-2b) dargestellt. Zuletzt ist es

möglich, die Kraftübertragung auch kraftschlüssig mittels einer angetriebenen bzw. gebremsten Rolle umzusetzen, was in Abbildung 7-2c) schematisch abgebildet ist. Die Hauptfunktionen „Kraft in x-Richtung aufbringen“ und „Elektrode führen“ können somit mit diesen Prinziplösungen erfüllt werden. (A_Bauer 2023, S. 37–38; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 2)

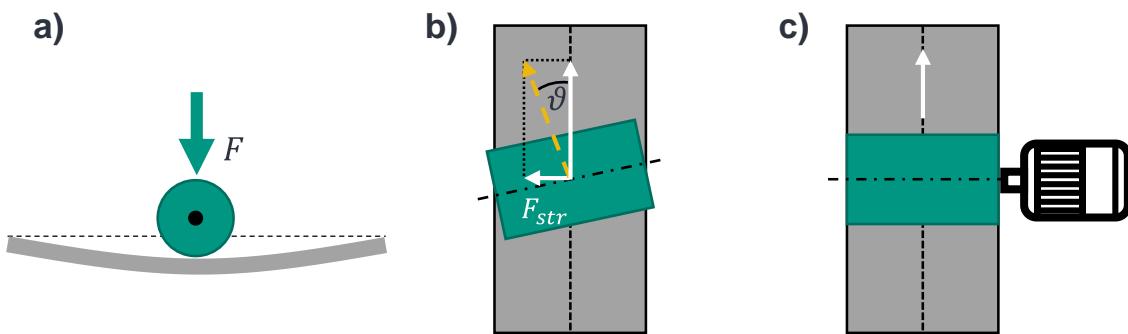


Abbildung 7-2 Verschiedene Möglichkeiten der kontinuierlichen Kraftübertragung mit Hilfe von Rollen: a) formschlüssig durch Andruckkraft der Rolle, b) kraftschlüssig durch Reibung mit Anstellwinkel, c) kraftschlüssig durch Antriebsmoment nach (A_Bauer 2023, S. 38; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)

Aufgrund der vielversprechenden Vorversuche soll auch eine diskontinuierliche Kraftübertragung in Betracht gezogen werden. Diese wird als zeitdiskreter, sich wiederholender Krafteintrag mit konstanter Zeitdauer definiert, was zur Folge hat, dass kraftlose Zeitabschnitte existieren (A_Bauer 2023, S. 38; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 2). Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Bereitstellung der mechanischen Energie. So sind mechanische, elektrische, pneumatische und hydraulische Energiewandler denkbar. Mit hydraulischen Systemen können sehr große Kräfte erzeugt werden, die jedoch für den hier gezeigten Anwendungsfall überdimensioniert wären. Weiter ist die Auslegung für einen ersten Prototyp komplex und die Anschaffungskosten sind vergleichsweise hoch. Pneumatische Systeme sind aufgrund der Kompressibilität der Luft für gleichförmige Bewegungen nicht geeignet. Nicht zuletzt werden hydraulische bzw. pneumatische Medien benötigt. Beide Kraftübertragungsarten werden daher für die weitere Betrachtung ausgeschlossen. (Fricke & Günzel et al. 2022, S. 34; Watter 2017, S. 2,4) Insbesondere mechanische Kurvengetriebe kommen aufgrund ihres geringen Bauraumbedarfs und der hohen Genauigkeit infrage (Fricke & Günzel et al. 2022, S. 180). Elektrische Antriebe haben einen hohen Wirkungsgrad, sind sehr gut steuer- und regelbar und lassen sich einfach bedienen und integrieren (Riefenstahl 2010, S. 3).

Wie bereits beschrieben, kann der Krafteintrag kontinuierlich oder diskontinuierlich erfolgen. Daher werden in dem morphologischen Kasten in Tabelle 7-1 zwei mögliche Konzepte ausgewählt. Der elektromagnetische Aktuator wäre für die Aufbringung der Streckkraft wesentlich komplexer in der Auslegung und Ansteuerung als die Rolle und die Feder und scheidet daher aus. Auch das Koppelgetriebe verliert aufgrund der komplexeren Auslegung und des Bauraums gegenüber dem Kurvengetriebe und der direkten Kraftübertragung. Da die beiden gefundenen Lösungsansätze reibungsbasiert sind und das Substrat empfindlich ist, kommt eine starre Oberfläche ebenfalls nicht infrage. Die kontinuierliche Lösung wird als Rollenkonzept bezeichnet und ist im morphologischen Kasten durch die dunkelgraue Schattierung bei fett und weiß markierter Schrift gekennzeichnet. Die diskontinuierliche Lösung wird „Fingergreiferkonzept“ genannt und ist durch die hellgraue Schattierung und kursive Schrift markiert. Die Entwicklung der beiden Konzepte aus den Teillösungen des morphologischen Kastens wird in den folgenden Kapiteln 7.1.3 und 7.1.4 detailliert beschrieben. (A_Bauer 2023, S. 37-41, 44-45; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 2-3)

Tabelle 7-1 Morphologischer Kasten für die potenziellen Teillösungen mit dem Rollenkonzept in dunkelgrau und dem Fingergreiferkonzept in hellgrau nach (A_Bauer 2023, S. 41, 45; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)

	Funktion	Elemente		
		1	2	3
A	Aufbringen der Streckkraft F_{str}	Rolle	<i>Feder</i>	Elektromagnetischer Aktuator
B	Führung der Elektrode	Rollführung passiv (keiner) direkt	<i>Gleitführung</i>	-
C	Antrieb		<i>Elektromotor</i>	-
D	Kraftübertragung		<i>Kurvengetriebe</i>	Koppelgetriebe
E	Kontaktfläche	starr	weich, griffig	<i>weich, gleitend</i>

7.1.3 Rollenkonzept

Aus dem morphologischen Kasten in Tabelle 7-1 gehen die Teillösungen für das Rollenkonzept hervor. Abbildung 7-3 zeigt die Prinzipskizzen der Lösung. Es kommen zwei mitlaufende Rollen zum Einsatz, die symmetrisch von oben auf den freien, unbeschichteten Substratrand gedrückt werden.

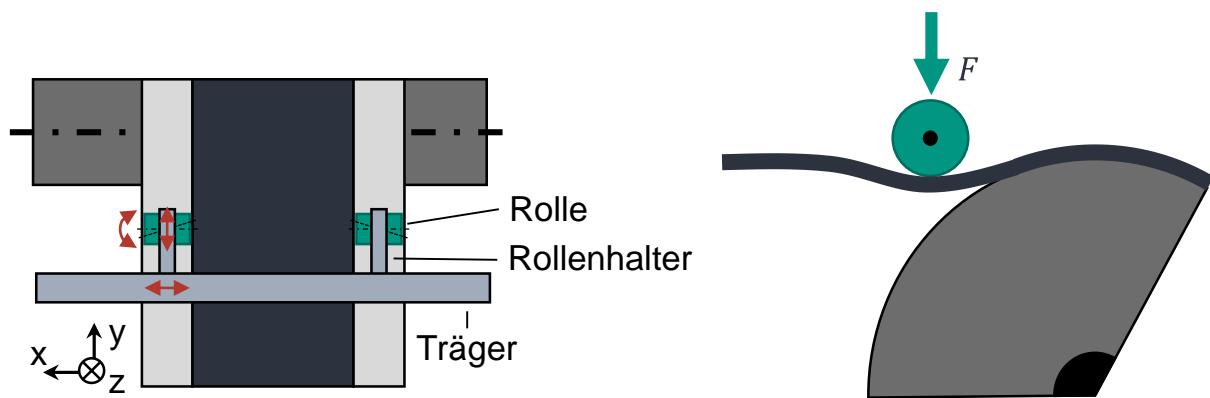


Abbildung 7-3 Prinzipskizzen des Rollenkonzepts nach (A_Bauer 2023, S. 43)

Beide Rollen sind in einer Halterung befestigt, welche in Abbildung 7-4a) zu sehen ist. Die Rollen sind in einem Träger drehend gelagert, sodass verschiedene Winkel ϑ eingestellt werden können. So werden die beiden Hauptfunktionen „Kraft in x-Richtung aufbringen“ und „Elektrode führen“ realisiert. Der Rollenträger wird mit einer Schiene mittels eines Langlochs verschraubt, sodass eine Positionierung in Laufrichtung möglich ist. Somit ist der Abstand zur Umlenkrolle einstellbar. Die Stärke der Anpresskraft der Rollen wird durch den Abstand in z-Richtung definiert, welcher über die Anzahl der verwendeten Unterlegscheiben eingestellt wird.

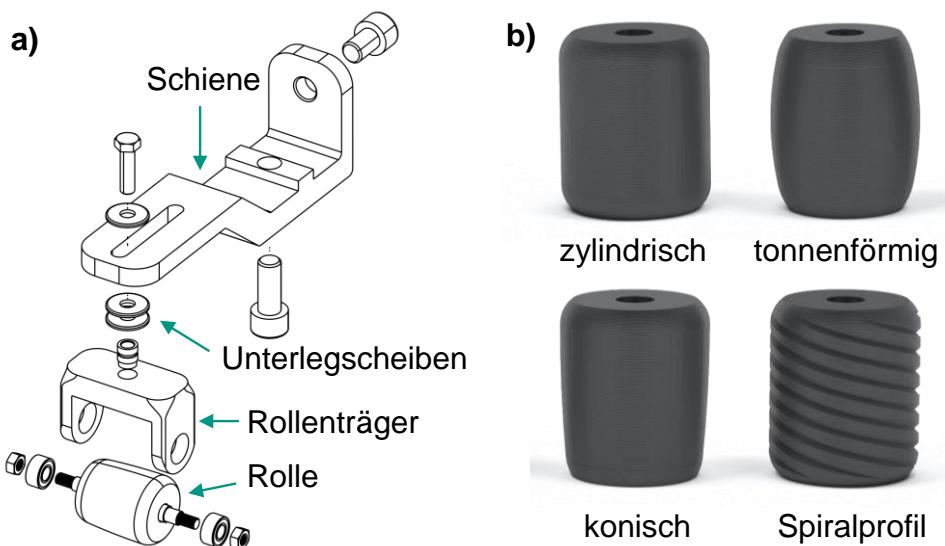


Abbildung 7-4 a) Rollenhalter nach (A_Bauer 2023, S. 50) b) verschiedene Rollengeometrien nach (A_Bauer 2023, S. 49; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)

Die Rollenhalter sind individuell in x-Richtung verschiebbar an einem Träger montiert, welcher als einfaches Al-Profil realisiert ist. Durch die Positionierbarkeit in x-Richtung kann flexibel auf Formatänderungen reagiert werden. Der Träger ist durch Schraubenverbindungen über eine verdrehsichere Trägerplatte fest mit der Ständerung des

Zugwerks verbunden und wird parallel zur Umlenkrolle angebracht. Der Träger sowie die Trägerplatten mit den Rollenhaltern sind im CAD-Modell des Gesamtkonzepts nach der Integration in die Ständerung des Zugwerks in Abbildung 7-5 dargestellt.

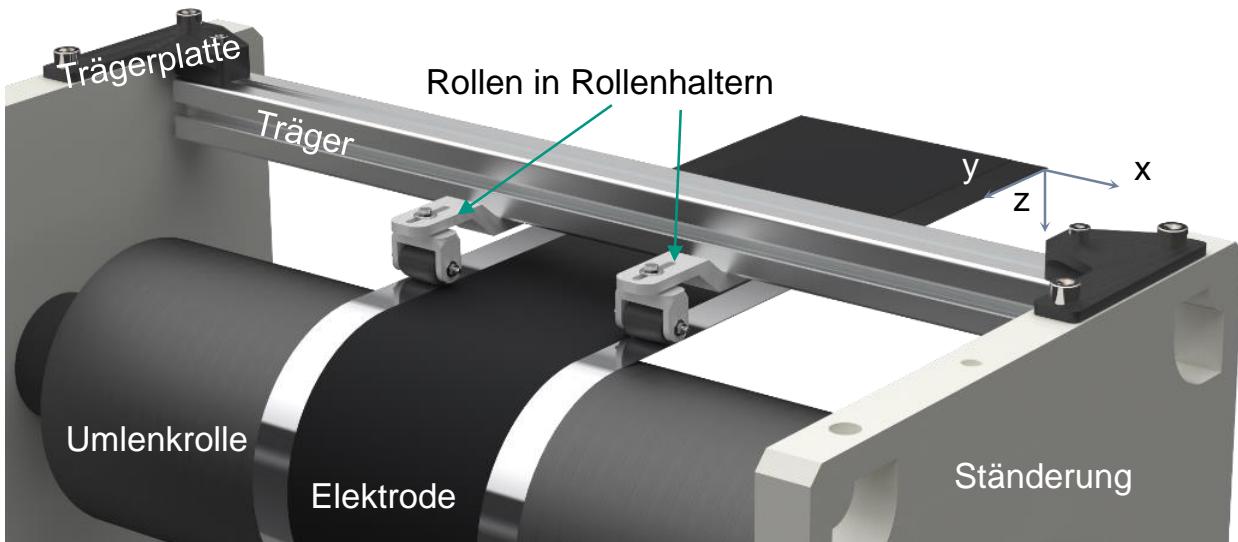


Abbildung 7-5 CAD-Modell des gesamten Rollenkonzepts nach (A_Bauer 2023, S. 52; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)

Alle Komponenten sind aufgrund der Schraubverbindungen einfach und schnell montier- und demontierbar, wodurch ein Austausch der Komponenten möglich ist.

Für die Rollen selbst werden vier Geometrien ausgewählt, die in Abbildung 7-4b) dargestellt sind. Abgerundete Kanten an allen Rollen verhindern die Beschädigung der Elektrode an den Übergängen. Am einfachsten ist die rein zylindrische Form gestaltet, die einer gewöhnlichen Umlenkrolle entspricht. Als weitere Geometrie wird eine Tonnenform gewählt, die sich an den konvexen Breitstreckwalzen aus Kapitel 2.6.1 orientiert. Abbildung 7-4b) zeigt eine konische Form, deren Durchmesser ausgehend von der Elektrodenmitte zugewandten Seite in Richtung Bahnaußenkante abnimmt. So soll eine nach außen wirkende Kraft induziert werden. Zuletzt wird eine spiralförmige Profilierung in die einfache zylindrische Form eingebracht. Aus Kapitel 2.6.1 ist bekannt, dass Breitstreckwalzen häufig eine elastische Oberfläche aufweisen, weshalb die Rollen aus thermoplastischem Polyurethan (TPU) mit der 95 Shore A Härte (Fa. Ultimaker) mittels 3D-Druck gefertigt werden. Die Steifigkeit der Rolle wird durch den inneren Aufbau der Rolle definiert. Iterativ bestimmen sich die geeigneten Druckparameter zu einem Füllgrad von 35 % bei jeweils fünf Wandschichten und einem kreuzförmigen Füllmuster.

(A_Bauer 2023, S. 48–52; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3–4)

Das gezeigte Konzept ähnelt dem in Abbildung 2-20 abgebildeten Konzept zweier Führungsrollen nach einer konvexen Walze von (Tanaka 2006). Wie bereits beschrieben, wurde dieses Konzept für Kunststoffbahnen mit einer Dicke > 10 µm ausgelegt und sieht die Kompensation des Geschwindigkeitsunterschieds vor, der durch die konvexe Walze hervorgerufen wird. (Tanaka 2006, S. 6–10) Aussagen zum Einsatz bei Metallfolien oder gar Elektroden bei der Abwesenheit von konvexen Rollen sind nicht enthalten und werden in der vorliegenden Arbeit untersucht.

7.1.4 Fingergräferkonzept

Die Teillösungen für das Fingergräferkonzept werden dem morphologischen Kasten in Tabelle 7-1 entnommen. Abbildung 7-6 zeigt die entsprechenden Prinzipskizzen. Das Fingergräferpaar ist symmetrisch angebracht und soll die Elektrode an den Rändern des Substrats einklemmen und in entgegengesetzter Richtung jeweils nach außen ziehen. Für einen gleichmäßigen Streckprozess sollen sich die Finger gleichzeitig sowie mit identischer Frequenz und Klemmkraft bewegen. Die Steifigkeit der kinematischen Kette bestimmt die Wiederholgenauigkeit der Bewegung. Daher muss die tragende Struktur fest an der Ständerung des Zugwerks fixiert werden. Ein Formatwechsel der Elektrode ist durch die Anpassung des Eingriffspunkts der Fingergräfer realisierbar. Wie in Abbildung 7-6 gezeigt, bewegen sich die Fingergräfer lediglich vor und zurück, wobei sie parallel einen Öffnungs- und Schließzyklus durchlaufen, sodass das Substrat geklemmt wird. Die Bahn läuft währenddessen kontinuierlich zwischen den Fingergräfern hindurch. (A_Bauer 2023, S. 44; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)

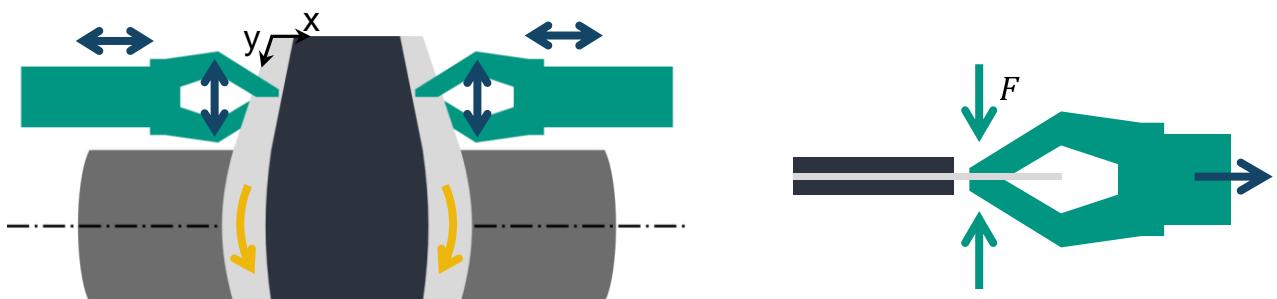


Abbildung 7-6 Prinzipskizzen des Fingergräferkonzepts nach (A_Bauer 2023, S. 45)

Die Zugkraft in x-Richtung wird daher durch Reibung zwischen den Fingergräfern und dem Substrat erzeugt, weshalb die Materialauswahl der Kontaktflächen essenziell ist. Gleichzeitig darf die Elektrode nicht beschädigt werden. Die Zugkraft lässt sich durch

die Schließkraft der Fingergreifer einstellen. (A_Bauer 2023, S. 44; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)

Abbildung 7-7 zeigt das CAD-Modell des gesamten Fingergreiferkonzepts nach dem Einbau in das Zugwerk. Für eine bessere Übersicht wird das gesamte Fingergreiferkonzept in die Module Antrieb, Tragstruktur und die eigentlichen Fingergreifer untergliedert (A_Bauer 2023, S. 44). Diese werden zusammen mit dem Bewegungsablauf des gesamten Systems im Folgenden dargestellt.

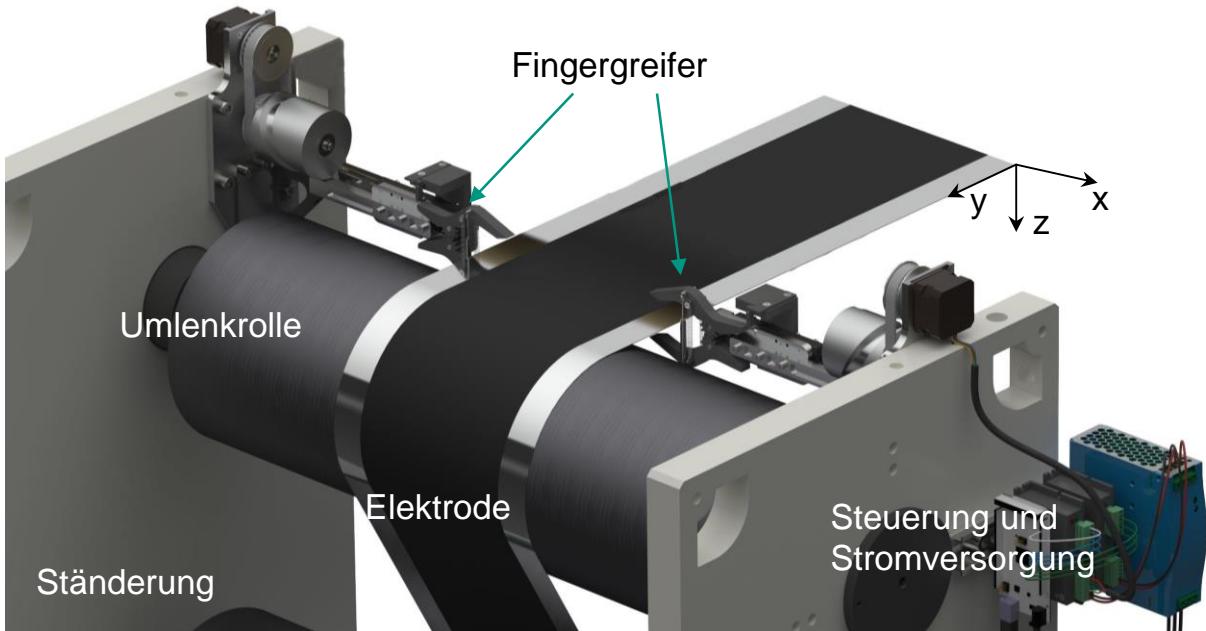


Abbildung 7-7 CAD-Modell des gesamten Fingergreiferkonzepts (A_Bauer 2023, S. 73; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)

7.1.4.1 Fingergreifermodul und Bewegungsablauf

Abbildung 7-8 zeigt das Fingergreifermodul skizzenhaft. Der Fingergreifer besteht aus zwei Fingern, welche drehbar in der sogenannten Fingerplatte gelagert und über ineinanderreibende Zahnräder verbunden sind. Die Schließkraft der Finger wird über ein Feder-Dämpfer-System erzeugt. Die Fingerplatte ist über den Stoßel mit dem Antrieb verbunden und sind der Tragstruktur zuzuordnen. (A_Bauer 2023, S. 61; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3–4)

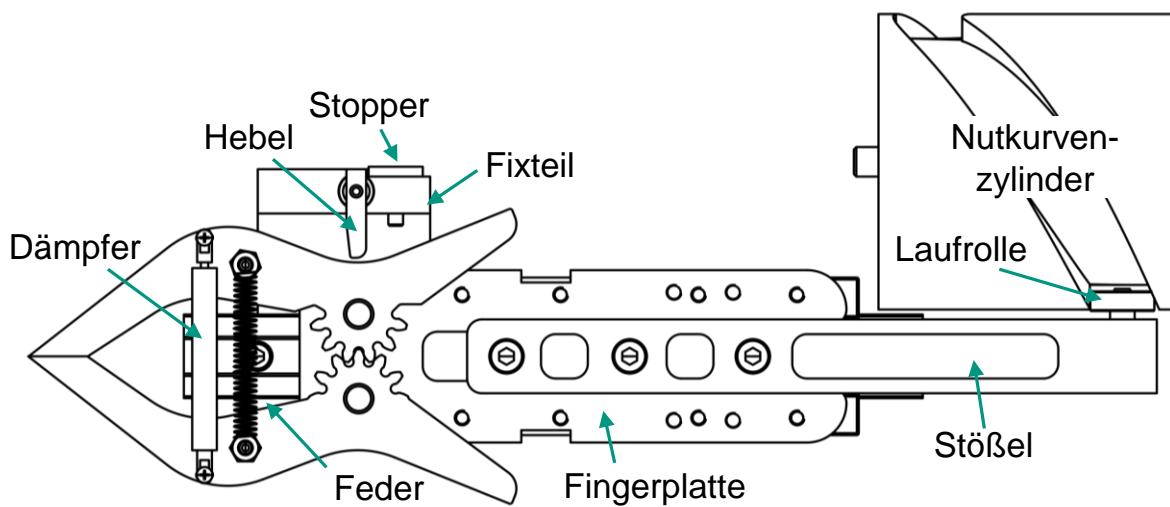


Abbildung 7-8 Skizze des Fingergreifers nach (A_Bauer 2023, S. 61; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)

Wie in Abbildung 7-9 dargestellt, wird das Öffnen und Schließen des Fingerpaars durch einen Hebelmechanismus realisiert.

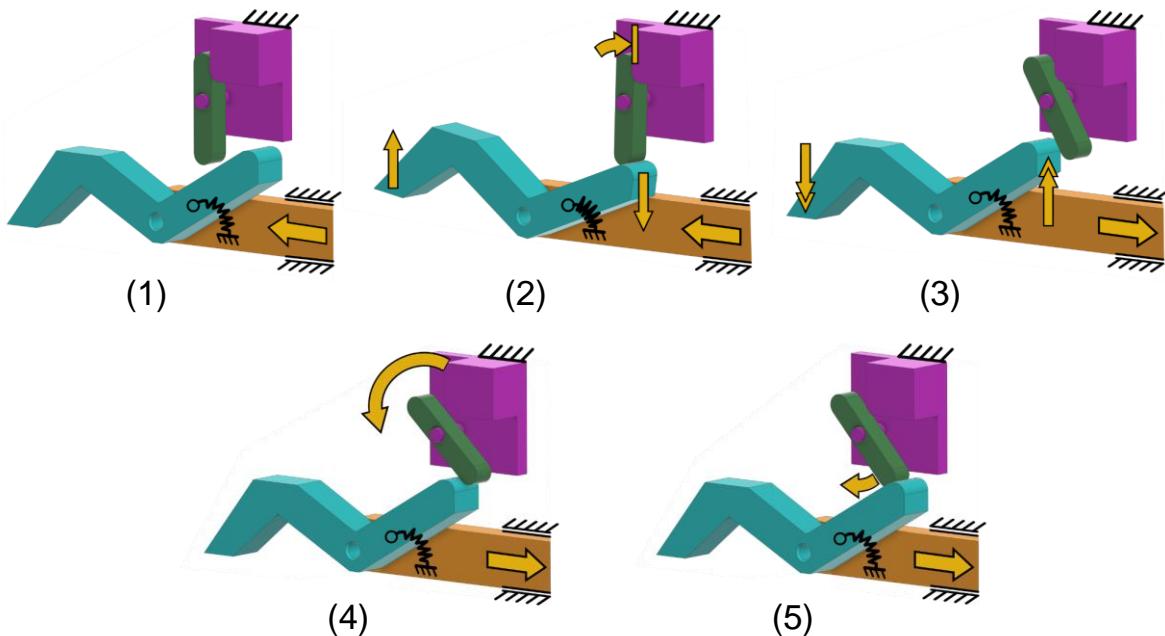


Abbildung 7-9 Detaillierter Bewegungsablauf des Fingergreifers nach (A_Bauer 2023, S. 55; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)

Der Hebel ist dazu drehbar in einem sogenannten Fixteil gelagert, welches sich nicht mit dem Stößel nach vorne bewegt. Der Stößel ist gleitend in einer Schienenführung gelagert. Bei der Vorwärtsbewegung wird die Drehbewegung durch einen Stopper limitiert, sodass dieser die Finger während der Vorwärtsbewegung aufdrückt (2). Der Stopper ist ebenfalls am Fixteil montiert. Der Fingergreifer bewegt sich bis zum

Umkehrpunkt nach vorne, bei dem der Kontakt zwischen Finger und Hebel abbricht und die Finger schließen (3). Ab diesem Zeitpunkt hat der Fingergreifer Kontakt zum unbeschichteten Substrat. Der Schließmechanismus wird durch einen Dämpfer verzögert. So wird gewährleistet, dass der Fingergreifer nicht im geschlossenen Zustand nach vorne fährt, da es andernfalls zu BahnrisSEN kommen kann. In der Rückwärtsbewegung kann sich der Hebel frei drehen und um das Ende des Fingers herum zurück in die kontaktfreie Ausgangslage wandern (5 und 1). Der Fingergreifer bleibt dabei aufgrund der Feder geschlossen. (A_Bauer 2023, S. 55, 61; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3–4)

7.1.4.2 Antrieb

Für beide Fingergreifer wird ein eigener Antriebsstrang vorgesehen, der in Abbildung 7-10 abgebildet ist.

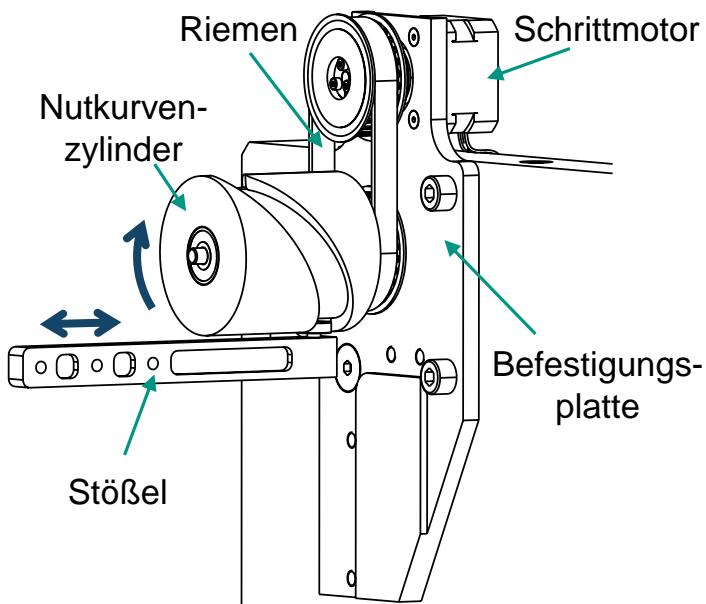


Abbildung 7-10 Antriebsstrang des Fingergreifers nach (A_Bauer 2023, S. 58)

Zur Realisierung der zyklischen Bewegung des Fingergreifers ist ein externer Antrieb notwendig. Dieser wird als elektrisch angetriebener Schrittmotor mit Kurvengetriebe in Form eines Nutkurvenzylinders ausgeführt. Die Rotation des Schrittmotors wird dabei anhand eines Zahnriemens mit der Übersetzung $i = 1$ auf den Nutkurvenzylinder übertragen. Durch die in die Mantelfläche gefräste Nut wird die rotierende Bewegung des Nutkurvenzylinders in eine zyklische Linearbewegung des Stößels übersetzt. Stössel und Nutkurve sind durch eine Laufrolle gekoppelt. Der Motor und der Nutkurvenzylinder sind auf einer Befestigungsplatte fixiert, die mit der Ständerung des Zugwerks verschraubt wird. Beide Motoren werden mithilfe eines gemeinsamen Arduino Mega 2560

Rev3 Mikrocontrollers (Arduino S.r.l.) gesteuert. (A_Bauer 2023, S. 58; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)

7.2 Validierung

Die Validierung der Funktionsfähigkeit der Konzepte wurde teilweise innerhalb der angeleiteten Abschlussarbeit (A_Seiraffi 2024) durchgeführt. Alle Ergebnisse sind hier in einer überarbeiteten Form dargestellt und in (Wurba & Bauer et al. 2024) publiziert.

Für die Validierung wird die NMC_30-Kathode verwendet, während die Kalandrierver suchen bei maximaler Anforderung aus höchster Dichte $\rho_{NMC} = 3.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ sowie höchstem Bahnzug $F_B = 110 \text{ N}$ gefahren werden. Die Walzentemperatur wird als $T_W = 30^\circ\text{C}$ eingestellt, um lange Aufheizphasen zu vermeiden und das Material bei längeren Standzeiten nicht unkontrolliert thermisch zu belasten. Die gewählten Versuchspараметer entsprechen also dem Versuch 6_NMC_30. (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4) Die Bahngeschwindigkeit beträgt wie für alle Versuche $1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

7.2.1 Rollenkonzept

Die Rollen werden zunächst parallel zur Umlenkrolle ($\vartheta = 0^\circ$) ausgerichtet und anschließend bei einem Winkel von $\vartheta = 10^\circ$ untersucht (vgl. Abbildung 7-2b). Mithilfe von drei Unterlegscheiben wird der Abstand der Rollen zur Elektrode minimiert, sodass eine leichte Andruckkraft entsteht. (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)

Tabelle 7-2 gibt einen Überblick, welche Rollentypen die Längsfaltenbildung in Abhängigkeit des eingestellten Winkels unterbinden können.

Tabelle 7-2 Funktionsfähigkeit der Rollentypen in Abhängigkeit des Anstellwinkels ϑ
(Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)

Winkel ϑ	zylindrisch	tonnenförmig	konisch	zylindrisch mit Spiralprofil
0 °	-	x	x	x
10 °	x	x	✓	✓

Bei einem Winkel von $\vartheta = 0^\circ$ kann die Längsfaltenbildung mit der einfach zylindrischen Rolle wie erwartet aufgrund der ausbleibenden Kraft in x-Richtung nicht verminder werden. Auch die übrigen Rollentypen zeigen keinen reduzierenden Effekt. Selbst bei dem Zylinder mit dem spiralförmigen Profil ist die nach außen treibende Kraft zu gering. Die Änderung des Winkels hin zu $\vartheta = 10^\circ$ kann für die einfach zylindrischen sowie für die

tonnenförmigen Rollen weiterhin keine Verbesserung herbeiführen. Die schräg gestellten konischen Rollen und die spiralförmigen Rollen verhindern jedoch die Längsfaltenbildung. Die konischen Rollen verhalten sich ähnlich wie eine Hälfte der bereits diskutierten konvexen Breitstreckwalzen. Sie strecken das Material zu der Seite mit dem schmäleren Durchmesser. Dies ist auch der Grund, weshalb die tonnenförmigen Rollen die Längsfaltenbildung nicht verhindern. Diese schieben die Elektrode in beide Richtungen, also auch zur Elektrodenmitte. Bei der geraden Ausrichtung ist die Kraft in x-Richtung nicht ausreichend stark. Die schräge Ausrichtung erhöht hingegen den Kraftanteil in x-Richtung. Analog gilt für die spiralförmig profilierte Rolle, dass die schräge Ausrichtung den durch die Spiralen hervorgerufenen Anteil der Kraft in x-Richtung erhöht. (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)

Zur Beurteilung der Führung der Elektrode wird deren Oberfläche mithilfe der in Kapitel 4.3.2 beschriebenen, laserbasierten Methode aufgezeichnet. Abbildung 7-11 zeigt einen exemplarischen Vergleich der aus den Laserdaten gewonnenen Querschnitte der untersuchten NMC_30-Kathode.

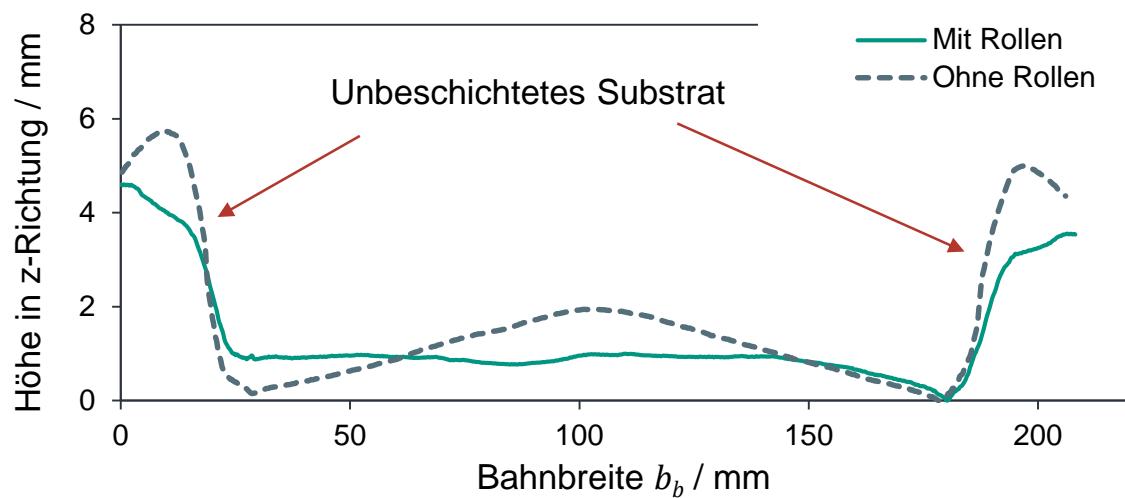


Abbildung 7-11 Exemplarischer Schnitt in x-Richtung durch die Laserdaten einer kalandrierten NMC_30-Kathode mit und ohne zusätzliche Rollen (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)

Dabei ist das grüne Profil der durch die konischen und mit Rollen geführten Kathode (konisch, $\vartheta = 10^\circ$) zuzuordnen und die dunkelgraue, gestrichelte Linie beschreibt die ungeführte Kathode. Eine ähnliche Krümmung der Gesamtelektrode wird auch in (Mayr & Schreiner et al. 2022, S. 298) beobachtet. Die unbeschichteten Substratränder der Breite 30 mm an beiden Enden der Profile verhalten sich unterschiedlich. Die Substratränder der Bahn, die durch die Rollen geführt werden, sind im Vergleich zu den

Substraträndern der ungeführten Elektrode deutlich flacher und tendenziell weniger nach oben geneigt. Dies führt zu einem geraderen Auftreffen des unbeschichteten Substratrands auf die Umlenkrolle und hemmt die Längsfaltenbildung. Die in Kapitel 5.1.2 diskutierte Wellenbildung sollte durch den Einsatz der Rollen unbeeinflusst bleiben, da diese bereits im Kalanderspalt entsteht. Die Rollen sorgen lediglich für eine Änderung des Querprofils (vgl. Abbildung 7-11), nicht aber für die Änderung des Längsprofils. (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)

Abbildung 7-12 zeigt Fotos der kalandrierten NMC_30-Kathode unter Einsatz der konischen und der spiralförmig profilierten Rollen. Es sind keine Längsfalten im unbeschichteten Bereich vorhanden. Die Rollen hinterlassen jedoch aufgrund ihrer rauen Oberfläche einen Abdruck auf dem Substrat, was es in zukünftigen Weiterentwicklungen zu optimieren gilt. Deutlich zu erkennen ist auch das Fehlerbild der Folienverprägung, welches jedoch nicht Ziel der Optimierung ist und daher an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt wird. (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5)

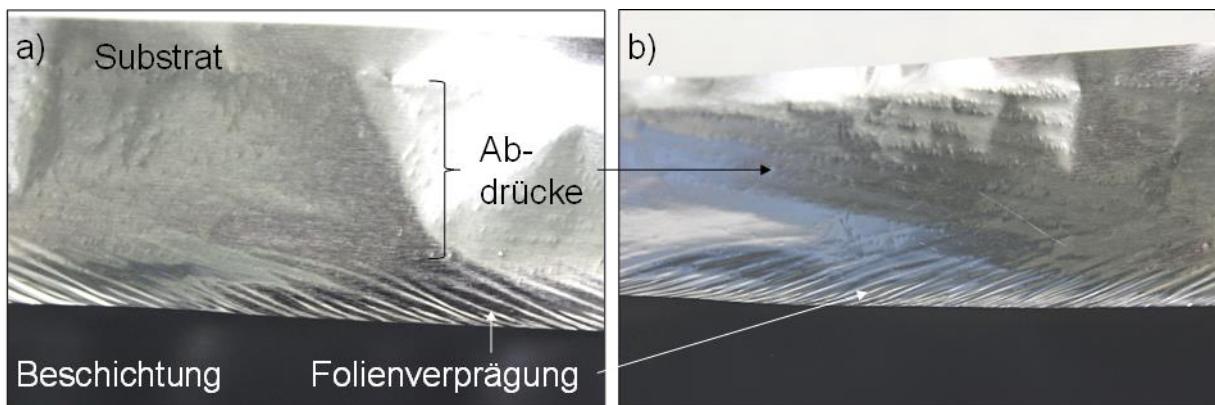


Abbildung 7-12 Längsfaltenfreie Elektroden: a) konische Rollen, b) spiralförmig profilierte Rollen (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5)

Insgesamt ist der umgesetzte Prototyp also bereits funktionsfähig und bedarf lediglich kleinerer Optimierungen für eine weitere Erprobung in einem größeren Maßstab und in industrienäheren Prozessfenstern.

7.2.2 Fingergriferkonzept

Tabelle 7-3 zeigt die zur Validierung durchgeführten Untersuchungen.

Tabelle 7-3 Versuchsplan zur Validierung der Funktionsfähigkeit der Fingergriferkonzepte (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5)

Versuchsnummer	Material Kontaktfläche	Kontaktfläche / mm ²	Federkraft gesamt / N	Motordrehzahl / rpm
F1	Glatter Filz	40	4,7	35
F2	Rauer Filz	40	4,7	35
F3	Strukturierter Gummi	40	8,5	35
F4	Strukturierter Gummi	40	8,5	70
F5	Glatter Gummi	40	8,5	35
F6	Glatter Gummi	40	12,4	35
F7	Glatter Gummi	84	12,4	35
Referenz: 6_NMC_30	-	-	-	-

Für die Kontaktfläche stehen verschiedene Materialien zur Verfügung, die in Abbildung 7-13 als Fotografien und 10-fach unter dem Lichtmikroskop vergrößert gezeigt sind.

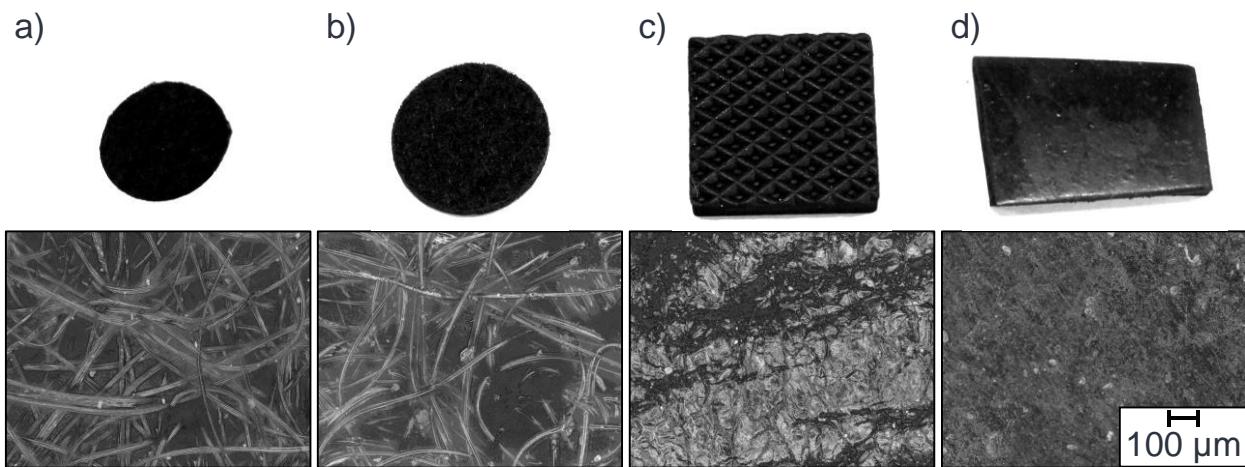


Abbildung 7-13 Fotografien (oben) (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5) und lichtmikroskopische Aufnahmen bei 10-facher Vergrößerung (unten) der Materialien der Kontaktflächen: a) glatter Filz, b) rauer Filz, c) strukturierter Gummi, d) glatter Gummi

Da Erfahrungswerte fehlen, werden zunächst zwei verschiedenen rauen Nadelfilze aus Polyethersulfon (PES) getestet, um das Risiko für Bahnrisse gering zu halten (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5). Der subjektiv auf der Haut als glatter empfundene Filz hat laut Herstellerangaben eine Dicke von 2,0 mm und ein Flächengewicht von 220 g·m⁻²,

während der subjektiv als rauer empfundene Filz 3,5 mm dick ist und mit $450 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ein höheres Flächengewicht aufweist. Zur Oberflächenbeschaffenheit lassen sich keine Angaben finden. Beide Filzgleiter hinterlassen keine Spuren auf dem Substrat. Die in Abbildung 7-13a) und b) dargestellten lichtmikroskopischen Aufnahmen der Filzgleiter zeigen keine eindeutigen Unterschiede oder Auffälligkeiten. Für die erweiterte Beurteilung der Reibwirkung der Kontaktflächen des Fingergreifers werden Reibversuche durchgeführt. Dazu wird das Kontaktflächenmaterial auf dem Schlitten aufgeklebt und eine unbeschichtete Al-Folie auf der Trägerplatte befestigt. Die in Abbildung 7-14a) dargestellten statischen und dynamischen Reibungskoeffizienten (μ_s und μ_d) für die beiden Filzgleiter zeigen, dass der subjektiv glattere Filz höhere Reibungskoeffizienten als der subjektiv rauere Filz aufweist (A_Seiraffi 2024, S. 96). Der Unterschied ist jedoch gering. Der subjektive Eindruck auf der Haut stimmt demnach nicht mit der Messung überein. Aus Konsistenzgründen wird die Bezeichnung dennoch beibehalten.

Zusätzlich werden zwei Gummiarten untersucht. Das erste Material ist ein strukturierter Anti-Rutsch-Gummigleiter, während das zweite Material ein SBR-Gummistreifen ist. Weitere Angaben sind nicht aufzufinden. (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5) Beide Materialien haben eine Dicke von 3 mm. Abbildung 7-13c) und d) zeigen die beiden Gummis. Anhand der statischen und dynamischen Reibungskoeffizienten (μ_s und μ_d) wird deutlich, dass die Gummis im Vergleich zu den Filzen erhöhte Reibungskoeffizienten aufweisen (A_Seiraffi 2024, S. 96). Die Reibkraft kann folglich mit diesen Materialpaarungen gesteigert werden. Dabei zeigt sich, dass der glatte Gummi nochmals eine Steigerung der Reibungskoeffizienten mit sich bringt (vgl. Abbildung 7-14a)) (A_Seiraffi 2024, S. 96). Die Kontaktmaterialien werden zugeschnitten und jeweils als Kontaktfläche auf die Fingergreiferspitzen geklebt (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5).

Auf beiden Seiten der Greifer gibt es die Möglichkeit, zwei Federn einzubauen, die die Schließkraft definieren. Da die Schließkraft durch die Federn eingestellt wird, werden im Verlauf der Versuche Federn mit verschiedenen Federkräften eingesetzt. Bahnrisse in Kombination mit dem Feder-Dämpfersystem werden nicht beobachtet. Die in Tabelle 7-3 aufgelisteten Federkräfte beziehen sich auf die Kombination der eingesetzten Federn. Weiter wird der Einfluss der Motordrehzahl untersucht. Der Dämpfer mit der Dämpferkonstante $156,25 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ (Herstellerangabe Weforma Dämpfungstechnik GmbH, turbulente Strömung im Zylinder, (Lorbach 2024)) wird nicht variiert, da die Schließzeit nicht verändert werden soll. Die letzte Variation enthält eine Vergrößerung

der Kontaktfläche des Fingergreifers, die in Abbildung 7-14b) dargestellt ist. (A_Seiraffi 2024, S. 96–97; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5)

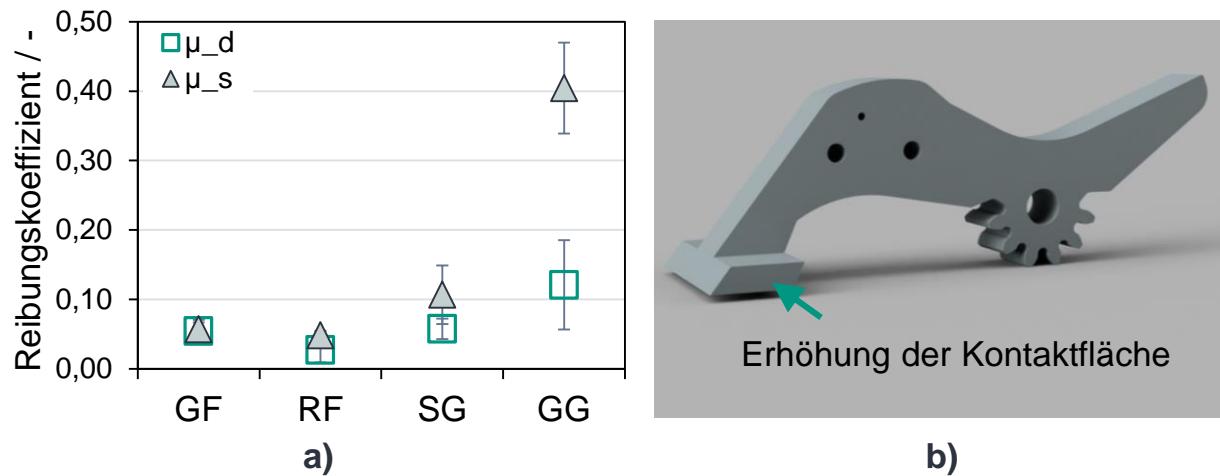


Abbildung 7-14 a) Dynamische und statische Reibungskoeffizienten (μ_d und μ_s) für den glatten (GF) und rauen Filz (RF) sowie für den strukturierten (SG) und glatten Gummi (GG), b) konstruktive Umsetzung der Erhöhung der Kontaktfläche (A_Seiraffi 2024, S. 96, 57)

Der Vergleich der Längsfaltenbildung unter Nutzung der Filzgleiter erfolgte ausschließlich optisch anhand von Fotos, sodass kein messbarer Unterschied gezeigt werden kann. Die Längsfaltenbildung wird immer wieder unterbrochen, jedoch nicht verhindert, wie in Abbildung 7-15 für beide Filzgleiter zu erkennen ist. Da diese Materialpaarungen wenig zielführend erscheint, werden diese Optionen ohne weitere Untersuchungen direkt verworfen.

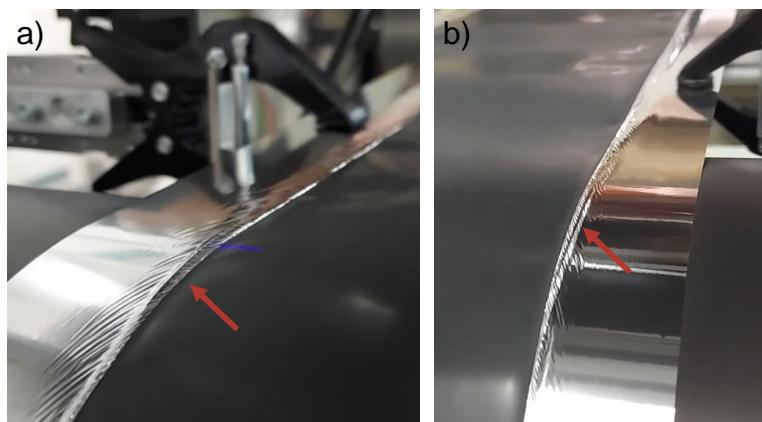
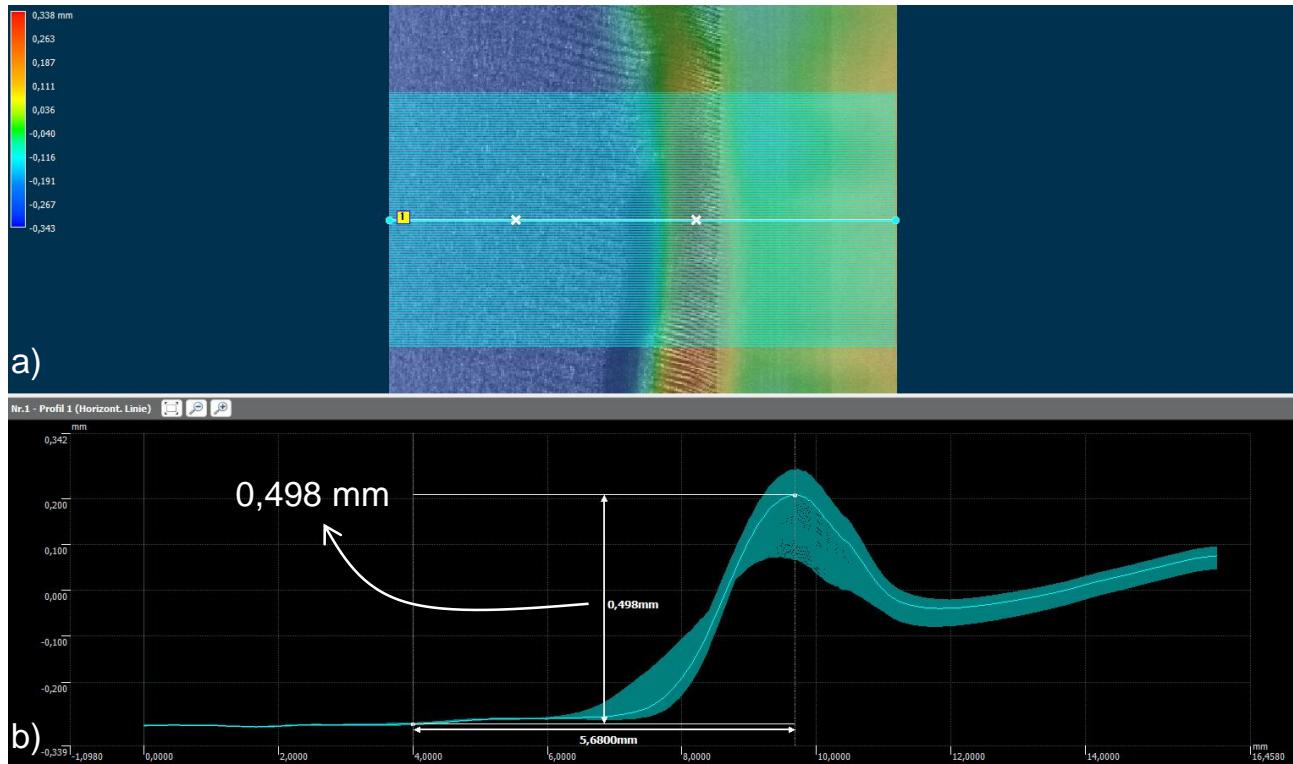


Abbildung 7-15 Längsfaltenbildung (rote Pfeile) mit Einsatz der Fingergreifer und den Kontaktflächen a) glatter Filz, b) rauer Filz

Eine weitere Erhöhung der Reibung zwischen Greifer und Substrat ist daher unabdingbar. Diese erfolgt durch den Einsatz der Gummigleiter und die Erhöhung der Federkraft.

Da die Längsfaltenbildung nicht unterbunden werden kann, wird die Geometrie der Längsfalten untersucht. Dazu werden die Daten mit einer Frequenz von 20 Hz wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben mit dem Laser aufgezeichnet, wobei die Auswertung nicht mit dem MATLAB-Skript durchgeführt werden kann (A_Seiraffi 2024, S. 60; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5). Die Falte bildet sich direkt an der Beschichtungskante, weshalb die benötigten Referenzpunkte nicht gefunden werden können (vgl. Abbildung 7-16b)).



*Abbildung 7-16 Auswertung der Längsfaltenhöhe mithilfe der Software LJ-X Observer:
a) Draufsicht mit eingezeichneten Schnittlinien b) gemittelte Profilansicht mit Angabe
des Höhenwertes in Anlehnung an (A_Seiraffi 2024, S. 61)*

Der Eingriffspunkt der Finger verringert die effektive beschichtungsfreie Substratbreite und gibt somit weniger Raum für die Ausbildung der Längsfalte. Eine Angabe der Distanz ist nicht möglich, da die der Beschichtungskante zugeneigte Seite der Längsfalte, wie in Abbildung 7-16b) zu erkennen ist, mit der Beschichtungskante verschmilzt. Aus dem gleichen Grund kann auch die Breite nicht zuverlässig gemessen werden. Die Höhe wird daher mithilfe der Software LJ-X Observer (KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH) ausgewertet. Dazu werden bis zu 100 Schnitte in einen Faltenabschnitt gelegt (vgl. Abbildung 7-16a)). Die durch die Software ermittelten, mittleren Höhen der zugehörigen Abschnitte (vgl. Abbildung 7-16b)) werden anschließend gesammelt und für jeden Versuch gemittelt. (A_Seiraffi 2024, S. 60; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5)

Abbildung 7-17 zeigt die Höhen der sich ausbildenden Längsfalten für die verschiedenen Variationen. Dabei dient die gepunktete Linie lediglich der besseren Lesbarkeit. Weiter ist als Vergleich der korrespondierende Versuch 6_NMC_30 ohne das Eingreifen der Fingergreifer zu sehen. Es wird der optische Ersteindruck bestätigt, dass die Längsfaltenbildung beeinflusst wird (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5). Die Höhe der Längsfalte sinkt für den Versuch F7 um 54,6 % beim Eingreifen der Fingergreifer. Der Vergleich von F3 und F4 zeigt tendenziell eine Senkung der Höhe durch die Steigerung der Motordrehzahl. Der Eingriff erfolgt dann öfter, jedoch ist die Eingriffszeit geringer. Der Wechsel vom strukturierten zum glatten Gummi (F3 nach F5) bringt lediglich einen minimalen Höhenverlust mit sich. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Streuung von F3 sehr hoch ist, was Interpretationen erschwert. Die Erhöhung der Schließkraft durch den Austausch der Federn (F5 nach F6) zeigt eine weitere Senkung der Höhe. Gleiches gilt für die Erhöhung der Kontaktfläche (F6 nach F7). (A_Seiraffi 2024)

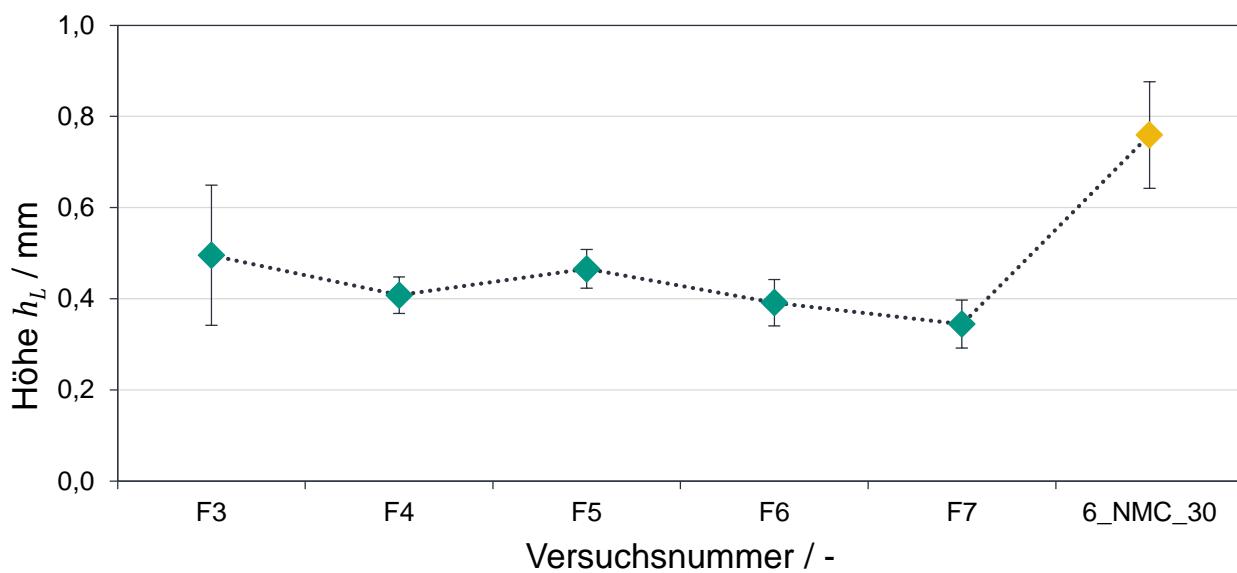


Abbildung 7-17 Änderung der Höhe der Längsfalte über die verschiedenen Versuchsparameter und Referenz ohne Eingreifen der Fingergreifer (6_NMC_30) nach (A_Seiraffi 2024, S. 100; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5)

Insgesamt ist der Einfluss der variierten Größen als eher gering einzustufen (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5). Dennoch lässt sich ableiten, dass die Erhöhung der Eingriffszahl pro Zeit, die Steigerung der Schließkraft sowie die Erhöhung der Reibfläche vielversprechend sind und als erste Anhaltspunkte für eine weitere Optimierung dienen können. Aus den Vorversuchen, bei denen die Bahn am unbeschichteten Substratrand händisch zur Seite gestreckt und geführt wurde, ist bekannt, dass eine seitliche

Krafteinwirkung die Längsfaltenbildung verhindern kann. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die aufgebrachte Streckkraft in dem untersuchten System zu gering ist, um die Längsfaltenbildung zu verhindern. Eine weitere Erhöhung der Schließkraft ist für den hier gezeigten Prototypen ohne Umkonstruktion nicht möglich, da die Steifigkeit der gedruckten Bauteile zu gering ist.

Analog zum Rollenkonzept wird davon ausgegangen, dass die Fingergreifer lediglich das Querprofil abflachen und die Wellenausbildung in Laufrichtung nicht beeinflusst wird.

Der Prototyp ist bereits in diesem gezeigten Entwicklungszustand in der Lage, die Längsfaltenbildung zuverlässig zu reduzieren und somit potenziell die resultierende Qualität der verschweißten Ableiterfahnen zu verbessern. Außerdem wird das Bahnrißrisiko maßgeblich minimiert. Insgesamt erweist sich das Fingerkonzept als vielversprechende Möglichkeit, die eingebrachte Streckkraft nach weiteren Optimierungsschritten und durch die Hinzunahme geeigneter Sensorik und Steuerungselemente gezielt und kontrolliert einzubringen. So könnte beispielsweise die Eingriffsgeschwindigkeit in Kombination mit der Klemmkraft der Fingergreifer variiert und deren Einfluss konkret untersucht werden. Die gezeigte Lösung hat somit das Potenzial, die Längsfaltenbildung automatisiert und steuerbar unterbinden zu können.

7.3 Fazit

Das kontinuierliche Rollenkonzept mit schräg gestellten konischen und zylindrischen, spiralförmig profilierten Rollen kann die Längsfaltenbildung unter den gezeigten Bedingungen unterbinden. Das unbeschichtete Substrat der geführten Kathoden trifft im Gegensatz zur ungeführten Kathode flacher auf die Umlenkrolle und die benötigte Ausgleichsbewegung bzw. Kompensation in Form der Längsfalte fällt somit geringer aus. Die Reibung zwischen den Rollen und dem unkalandrierten Substrat induziert eine Streckkraft nach außen, die für den flacheren unbeschichteten Substratrand ausreichend ist, um die Längsfaltenbildung zu verhindern. Die Oberflächenqualität der Rollen muss jedoch verbessert werden, um die Abdrücke im Substrat zu eliminieren. Das Rollenkonzept erweist sich also als fähig sowie einfach umzusetzen und ist somit aussichtsreich für die weitere Optimierung und eine Erprobung im Pilotmaßstab.

Das Fingergreiferkonzept mit der Kontaktfläche aus Gummi kann die Ausprägung der Längsfalten verändern. Insbesondere die Höhe der Längsfalte wird deutlich reduziert und die Längsfalten bilden sich direkt an der Beschichtungskante aus, da die effektive

unbeschichtete Substratbreite verringert wird. Da das manuelle Strecken der Elektrode vielversprechende Ergebnisse zeigt, wird davon ausgegangen, dass die aufgebrachte Streckkraft in Querrichtung zu gering ist. Eine Anpassung des Feder-Dämpfer-Systems sowie die Erhöhung der Angriffsfläche und die Wahl einer anderen Kontaktfläche können Abhilfe schaffen. Auch die Erhöhung der Eingriffszahl kann zu einer weiteren Reduktion der Längsfaltenbildung beitragen. Wird der gezeigte Prototyp nach der mechanischen Optimierung mit Sensorik und entsprechenden Steuerungskomponenten ausgestattet, so ist zudem eine gezielte Variation und Untersuchung des Einflusses verschiedener Parameterkombinationen möglich. Bereits jetzt wird die Elektrodenqualität durch die Reduktion der Längsfaltenbildung verbessert und das Bahnrisiko wird minimiert.

Beide Prototypen sind aktuell in ihrer Flexibilität und Automatisierung noch stark limitiert und bedürfen einer dahingehenden Optimierung. Die gezeigten Konzepte gewinnen aber vor allem dann an Bedeutung, wenn Umlenkrollen nicht durch Breitstreckwalzen ersetzt werden können, wie es beispielsweise bei Messwalzen der Fall ist. Sie können dann vor der Walze angebracht werden, um die Längsfaltenbildung zu unterbinden.

Eine Änderung der untersuchten Materialparameter durch den Einsatz der Rollen und Fingergreifer wird nicht erwartet. Es wird angenommen, dass die eingebrachte Streckkraft nicht ausreicht, um plastische Verformungen einzubringen, die als Dehnungen an der Oberfläche messbar sind. Diese Option sollte für zukünftige Weiterentwicklungen berücksichtigt werden. Ähnlich wie in (Barthel & Bold et al. 2022) gezeigt, könnten so Eigenspannungen ausgeglichen werden und die Elektrode könnte somit flacher auf die Umlenkrolle auftreffen. Auch die Biegesteifigkeit und Adhäsion sollten von dem Einsatz der Rollen und Fingergreifer unbeeinflusst bleiben, da sich beide nicht im Eingriff mit der Beschichtung befinden.

Zusammenfassend wird also gezeigt, dass die Längsfaltenbildung in kalandrierten Elektroden durch zusätzliche Streckeinheiten reduziert bzw. verhindert werden kann. Die Optimierung beider Konzepte kann langfristig dazu beitragen, Ausschuss in der Batterieproduktion zu vermindern. Auch die Kombination beider Konzepte zu einer kontinuierlichen, aktiv eingreifenden Streckung ist denkbar. Durch den materialunabhängigen Ansatz können auch neue und nachhaltigere Batteriesysteme ausschussminimaler produziert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel enthält die Zusammenfassung der wichtigsten Inhalte der vorliegenden Dissertation und gibt einen Ausblick hinsichtlich noch ungeklärter Forschungsfragen bezüglich der Längsfaltenbildung.

8.1 Zusammenfassung

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach LIB und der immer strenger werdenden Anforderungen an die Eigenschaften einer Batterie gilt es, einerseits das Material, aber andererseits auch die Produktion von Batterien zu optimieren. Eine vielversprechende Entwicklung auf der Materialseite ist beispielsweise die NIB, während auf der Produktionsseite versucht wird, Ausschuss zu reduzieren.

Der Prozessschritt des Kalandrierens liefert einen essenziellen Beitrag zur Erhöhung der volumetrischen Energiedichte. Gleichzeitig treten diverse Fehlerbilder auf, deren Ursprünge kaum erforscht sind. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Fehlerbild Längsfalte. Längsfalten sind plastische Deformationen, die meistens im unbeschichteten Bereich des Substrats und parallel zur Laufrichtung auftreten. Sie entstehen in Folge starker Verdichtung und hoher Bahnzüge, die jedoch für eine industrielle Produktion vonnöten sind. Längsfalten können Bahnrisse und Probleme bei der Weiterverarbeitung verursachen. Für die Reduktion der Längsfaltenbildung ist ein tiefgreifendes Material- und Prozessverständnis nötig, welches im Rahmen der vorliegenden Arbeit generiert wird.

In Kapitel 4 werden dazu alle Methodiken zur Charakterisierung der Geometrie der Längsfalte dargelegt. Die Höhen und Breiten der Längsfalten sowie ihre Distanzen zur Beschichtungskante werden mithilfe eines Lasertriangulationssensors sowie eines 3D-Scanners und einer MATLAB-Anwendung bestimmt. Weiter werden die Materialeigenschaften Dehnung, Deformation, Biegsteifigkeit und Adhäsion in Abhängigkeit der Prozessparameter gemessen und in Korrelation zur Geometrie der Längsfalten gesetzt. Für diese Untersuchungen werden eine LFP-Kathode sowie eine NMC811-Kathode mit dem gleichen Format verwendet. Die Dichte, der Bahnzug und die Walzentemperatur werden in drei Stufen anhand eines flächenzentrierten Versuchsplans variiert. Die in Kapitel 5.1 gezeigten Resultate ergeben zunächst eine weite Vernetzung aller Prozessparameter und Materialeigenschaften. Die häufigsten Zusammenhänge werden für die Dichte gefunden. So zeigen die Dehnungen, die breitenbezogene Biegsteifigkeit

sowie die Amplitude übereinstimmend positive Abhängigkeiten von der Dichte. Alle anderen Zusammenhänge gelten jeweils nur für eines der beiden Materialien oder die Abhängigkeiten unterscheiden sich zwischen den Materialien. In Kapitel 5.2 wird gezeigt, dass alle Prozessparameter einen Einfluss auf die Geometrie der Längsfalte haben, wobei es keine Faktorkombination gibt, die die Längsfaltenbildung unterbindet. Die Dichte hat als einziger Prozessparameter einen Einfluss auf alle drei Geometriewerte. Dabei steigt lediglich die Distanz für beide Kathoden. Weiter gibt es für beide Kathoden zwischen Bahnzug und Breite eine negative und zur Höhe positive Beziehung. Alle weiteren Zusammenhänge gelten jeweils nur für eines der beiden Materialien. Mit steigender Höhe nimmt außerdem die Breite in beiden Kathoden ab. Zuletzt werden keine für beide Kathoden geltenden Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften und der Geometrie der Längsfalte gefunden. Anhand einer weiteren NMC811-Kathode mit schmälerem, unbeschichtetem Substrat kann in Kapitel 5.4 gezeigt werden, dass die Steigerung des unbeschichteten Anteils eine Zunahme der Längsfaltenhöhe und Distanz bewirkt, während die Breite davon unbeeinflusst ist.

Gleichzeitig wird an neuen Materialien geforscht, die sich jedoch überwiegend noch im Labormaßstab befinden. Eine Ausnahme bildet die NIB, die bereits auf dem Markt erhältlich ist, aber noch nicht an die Eigenschaften der LIB herankommt. Anhand von HC-Anoden für die NIB wird in dieser Arbeit gezeigt, dass hinsichtlich des Materialverhaltens lediglich die Beziehung zwischen Dehnungen und Dichte übertragbar ist. Für die Adhäsion können die Erkenntnisse aus den LIB-Kathoden teilweise für HC-Anoden reproduziert werden, wobei sich hier bereits die LIB-Kathoden unterscheiden. Gleiches gilt für die Geometrie. Zusammengefasst lassen sich die Erkenntnisse aus den LIB-Kathoden also nicht uneingeschränkt auf die HC-Anoden transferieren.

Wie bereits erläutert, kann die Längsfaltenbildung im geforderten Prozessfenster durch die Anpassung der Prozessparameter nicht verhindert, aber beeinflusst werden. Daher werden eine kontinuierliche und eine diskontinuierliche Zusatzvorrichtung zur Reduktion der Längsfaltenbildung entwickelt und an der ersten Umlenkrolle nach dem Kalanderspalt in das Zugwerk integriert. Das kontinuierliche Rollenkonzept kann die Längsfaltenbildung mit konischen und spiralförmig profilierten Zylinderrollen unter einem Anstellwinkel von 10 ° unterbinden, da die Deformation der Kathode ausgeglichen werden kann und die Streckwirkung in x-Richtung ausreichend groß ist. Das diskontinuierliche Fingerkonzept kann die Längsfaltenbildung hinsichtlich der Höhe reduzieren, jedoch nicht verhindern. Die Klemmkraft und somit die Streckwirkung reicht bei diesem ersten

Prototyp nicht aus. Die allgemeine Funktionsfähigkeit dieses Wirkprinzips kann jedoch durch manuelles Ziehen nachgewiesen werden.

8.2 Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wird das Fehlerbild Längsfalte hinsichtlich der Geometrie in Abhängigkeit der Prozessparameter Dichte, Bahnzug und Walzentemperatur untersucht. Die Versuchsergebnisse geben einen umfassenden Eindruck über die Zusammenhänge. Dennoch können insbesondere die Einflüsse des Bahnzugs und der Temperatur nicht abschließend geklärt werden. Da die Durchführung der Versuche sehr aufwändig ist, könnte in folgenden Arbeiten ein simulationsbasiertes Material-Prozess-Modell entwickelt werden. Anhand darauf aufbauender Simulationen könnte die Längsfaltenbildung hinsichtlich eines erweiterten Prozessfensters und für verschiedene Eigenschaften der Elektroden untersucht werden. Eine Erweiterung des Prozessfensters könnte beispielsweise eine Variation der Bahngeschwindigkeit, der Umschlungswinkel oder das Hinzufügen einer Vorheizstrecke umfassen. Hinsichtlich der Eigenschaften der Elektrode wären unter anderem die Massenbeladung, die Art und Eigenschaften des Substrates, mehrstreifige Elektroden, aber auch die Zusammensetzung der Beschichtung von Interesse. Die Validierung des Modells kann dann anhand der in dieser Dissertation erarbeiteten Charakterisierungsmethodik erfolgen.

In dieser Arbeit werden die Höhe und Breite der Längsfalte sowie die Distanz zur Beschichtungskante untersucht. Dabei wird festgestellt, dass die Längsfalten teilweise wandern, auslaufen und sich dann auch wieder neu bilden. Um diese Phänomene besser zu verstehen, sollten die Längsfalten in zukünftigen Arbeiten über einen größeren Zeit- bzw. Streckenabschnitt beobachtet werden. So könnten auch die Länge der Längsfalten sowie insbesondere für sehr kurze Längsfalten auch der Winkel zur Beschichtungskante zur Charakterisierung herangezogen werden.

Weiter wird insbesondere bei den HC-Anoden häufig eine Doppelfalte, also zwei parallele Längsfalten, beobachtet. In der vorliegenden Arbeit konnte dieses Phänomen aufgrund des Messaufbaus nicht ausreichend charakterisiert werden. Der Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Elektroden und den Prozessparametern, die zur Bildung von mehreren parallelen Längsfalten führen, kann daher in weiteren Arbeiten detaillierter untersucht werden.

Die HC-Anoden konnten weiterhin lediglich hinsichtlich der Dichte untersucht werden, da die Materialmenge keine weiteren Versuche zuließ. Es wäre daher von großem

Interesse, auch den Einfluss der übrigen Prozessparameter zu charakterisieren. Dies kann zukünftig dazu beitragen, die Abschätzung der Verarbeitbarkeit neuer Materialien voranzutreiben. Außerdem wären weitere Untersuchungen mit fehlerfreien Elektroden wünschenswert, um die hier gezeigten Ergebnisse zu stützen oder ein erweitertes Verständnis zu schaffen.

Auch die Untersuchung der Einflüsse der Prozessparameter auf die Materialeigenschaften ist komplex und hinterlässt noch ungeklärte Zusammenhänge, für die ein erweitertes Materialverständnis vonnöten ist. Gleches gilt für den Einfluss der Materialeigenschaften auf die Bildung der Längsfalten. Sicherlich gibt es weitere, noch unentdeckte Materialeigenschaften, die die Längsfaltenbildung beeinflussen. Insbesondere der Effekt der Temperatur kann anhand der gemessenen Materialparameter nur eingeschränkt erklärt werden. So wäre beispielsweise eine detaillierte Analyse der Materialeigenschaften des Binders interessant, um Rückschlüsse auf den Einfluss der Temperaturabhängigkeit des Materialverbundes ziehen zu können. Auch Simulationen des Verhaltens des Materialverbundes während der Verdichtung könnten hier einen Mehrwert bieten, um die Zusammenhänge besser zu verstehen. So könnten die Spannungszustände auch innerhalb der Beschichtung und insbesondere an der Grenze zum Substrat analysiert werden, statt nur an der Oberfläche.

Zuletzt könnten auch die Effekte der Anlagentechnik im Detail untersucht werden, indem Vergleichsstudien an anderen Kalandern durchgeführt werden. So könnten beispielsweise die Anordnung der Umlenkrollen oder der Walzendurchmesser als Einflussfaktoren untersucht werden.

Ein weiteres Ziel dieser Dissertation ist es, Möglichkeiten zu finden, mit denen die Längsfaltenbildung unabhängig von den Materialeigenschaften und Prozessparametern reduziert werden kann. Beide entwickelten Prototypen können noch weiter automatisiert und mit Sensorik ausgestattet werden, sodass reproduzierbare Versuche durchgeführt werden können. Weiter muss die Oberfläche der Rollen des Rollenprototypen verbessert werden, da diese im derzeitigen Zustand Eindrücke hinterlassen. Der Fingergreiferprototyp benötigt eine Optimierung hinsichtlich der aufgebrachten Streckkraft, die aktuell für eine vollständige Unterbindung der Längsfaltenbildung nicht ausreichend ist. Dies kann beispielsweise durch eine Erhöhung der Schließkraft, der Kontaktfläche und der Reibung erreicht werden. Dazu muss auch die Gesamtsteifigkeit des Systems erhöht werden. Geeignete Sensorik und Steuerungskomponenten können zudem eine gezielte Untersuchung des Einflusses verschiedenster Prozessparameter wie

die Klemmkraft oder die Eingriffszahl ermöglichen. Für weitere Versuche ist es außerdem notwendig, die Position des Fingergreifers zum Zeitpunkt des Schließens variieren zu können, da die Bahn während des Kalandrierprozesses wandert. Dies ist an der Bestandsanlage kaum zu verhindern, während eine ständige Nachregelung sehr material- und zeitintensiv ist. Weiter sollten auch verschiedene Elektrodenformate untersucht werden, für die eine Variierbarkeit der Eingriffsposition ebenfalls vonnöten ist.

9 Publikationsliste

Die im Folgenden aufgelisteten Publikationen sind während der Tätigkeit der Autorin als Wissenschaftliche und Hilfswissenschaftliche Mitarbeiterin am wbk Institut für Produktionstechnik entstanden.

(Coutandin & Wurba et al. 2019)

Coutandin, S.; Wurba, A.; Luft, A.; Schmidt, F.; Dackweiler, M. & Fleischer, J. (2019), *Mechanical characterisation of the shear, bending and friction behaviour of bindered woven fabrics during the forming process*, Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 50 (12), S. 1573–1587, DOI: 10.1002/mawe.201900074.

(Hofmann & Wurba et al. 2020)

Hofmann, J.; Wurba, A.-K.; Bold, B.; Maliha, S.; Schollmeyer, P.; Fleischer, J.; Klemens, J.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2020), *Investigation of Parameters Influencing the Producibility of Anodes for Sodium-Ion Battery Cells*, In BA. Behrens, A. Brosius, W. Hintze, S. Ihlenfeldt, & J. P. Wulfsberg (Hrsg.), *Production at the leading edge of technology. WGP 2020. Lecture Notes in Production Engineering* (S. 171–181), Springer Berlin Heidelberg, Dresden, Deutschland, 23.09. - 24.09.2020, DOI: 10.1007/978-3-662-62138-7_18.

(Klemens & Wurba et al. 2023)

Klemens, J.; Wurba, A.-K.; Burger, D.; Müller, M.; Bauer, W.; Büchele, S.; Leonet, O.; Blázquez, J. A.; Boyano, I.; Ayerbe, E.; Ehrenberg, H.; Fleischer, J.; Smith, A.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2023), *Challenges and Opportunities for Large-Scale Electrode Processing for Sodium-Ion and Lithium-Ion Battery, Batteries & Supercaps*, 6 (11), DOI: 10.1002/batt.202300291.

(Liu & Baumann et al. 2022)

Liu, H.; Baumann, M.; Dou, X.; Klemens, J.; Schneider, L.; Wurba, A.-K.; Härlinger, M.; Scharfer, P.; Ehrenberg, H.; Schabel, W.; Fleischer, J.; Aßen, N. & Weil, M. (2022), *Tracing the technology development and trends of hard carbon anode materials - A market and patent analysis*, Journal of Energy Storage, 56, S. 105964, DOI: 10.1016/j.est.2022.105964.

(Mayer & Wurba et al. 2021)

Mayer, D.; Wurba, A.-K.; Bold, B.; Bernecker, J.; Smith, A. & Fleischer, J. (2021), *Investigation of the Mechanical Behavior of Electrodes after Calendering and Its Influence on Singulation and Cell Performance*, Processes, 9 (11), DOI: 10.3390/pr9112009.

(Wurba & Altmann et al. 2024)

Wurba, A.-K.; Altmann, L. & Fleischer, J. (2024), *Analysis of longitudinal wrinkle formation during calendering of NMC811 cathodes under variation of different*

process parameters, Production Engineering, 18, S. 497–506, DOI: 10.1007/s11740-023-01258-8.

(Wurba & Bauer et al. 2024)

Wurba, A.-K.; Bauer, V.; Seiraffi, K. & Fleischer, J. (2024), *Concepts for the Reduction of Longitudinal Wrinkles During Calendering of Battery Electrodes*, Proceedings of the 57th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2024 (CMS 2024), 130, S. 456–461, Póvoa de Varzim, Portugal, 29.05. - 31.05.2024, DOI: 10.1016/j.procir.2024.10.114.

(Wurba & Bilger et al. 2024)

Wurba, A.-K.; Bilger, C.; Rehm, P. & Fleischer, J. (2024), *Approach to evaluate handling processes of polyethylene oxide (PEO)- based composite cathodes*, Proceedings of the 10th CIRP Conference on Assembly Technology and Systems (CIRP CATS 2024), 127, S. 14–19, Karlsruhe, Deutschland, 24.04. - 26.04.2024, DOI: 10.1016/j.procir.2024.07.004.

(Wurba & Goldschmidt et al. 2024)

Wurba, A.-K.; Goldschmidt, R. & Fleischer, J. (2024), *Comparison of Longitudinal Wrinkle Formation During Calendering of NMC811 and LFP Cathodes*, Proceedings of the 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS), S. 1–8, Bamberg, Deutschland, 05.06. - 06.06.2024, DOI: 10.1109/EPTS61482.2024.10586729.

(Wurba & Klemens et al. 2023)

Wurba, A.-K.; Klemens, J.; Mayer, D.; Reusch, C.; Altmann, L.; Leonet, O.; Blázquez, J. A.; Boyano, I.; Ayerbe, E.; Scharfer, P.; Schabel, W. & Fleischer, J. (2023), *Methodology for the characterization and understanding of longitudinal wrinkling during calendering of lithium-ion and sodium-ion battery electrodes*, Proceedings of the 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP CMS '23, 120, S. 314–319, Kapstadt, Südafrika, 24.10. - 26.10.2023, DOI: 10.1016/j.procir.2023.08.056.

10 Literaturverzeichnis

Verweise gemäß dem Schema (A_Name Jahr) beziehen sich auf studentische Arbeiten, die von der Verfasserin dieser Dissertation angeleitet wurden.

(A_Altmann 2022)

A_Altmann, L. (2022), *Einflussanalyse varierbarer Prozessparameter auf die Längsfaltenbildung beim Kalandrieren von Batterieelektroden mittels statistischer Versuchsplanung*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Bauer 2023)

A_Bauer, V. (2023), *Entwicklung einer konstruktiven Maßnahme zur Verhinderung der Längsfaltenbildung beim Kalandrieren von Batterieelektroden*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Goldschmidt 2023)

A_Goldschmidt, R. (2023), *Untersuchung der Längsfaltenbildung beim Kalandrieren von Batterieelektroden mittels Design of Experiments anhand der Parameter Bahnzug, Dichte und Temperatur*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Reusch 2023)

A_Reusch, C. (2023), *Automatisierung einer Methodik zur Analyse der Längsfaltenbildung beim Kalandrieren von Batterieelektroden und Umsetzung am Beispiel von Hard Carbon Anoden*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Seiraffi 2024)

A_Seiraffi, K. (2024), *Analyse und Vorbeugung der Bildung von Fehlerbildern beim Kalandrieren unter Berücksichtigung des Materialverhaltens von Hard Carbon Batterieanoden mithilfe eines Matlab-Tools*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Abdelkhalek & Zahrouni et al. 2015)

Abdelkhalek, S.; Zahrouni, H.; Legrand, N. & Potier-Ferry, M. (2015), *Post-buckling modeling for strips under tension and residual stresses using asymptotic numerical method*, International Journal of Mechanical Sciences, 104, S. 126–137, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2015.10.011.

(Abdelkhalek & Zahrouni et al. 2009)

Abdelkhalek, S.; Zahrouni, H.; Potier-Ferry, M.; Legrand, N.; Montmitonnet, P. & Buessler, P. (2009), *Coupled and uncoupled approaches for thin cold rolled strip buckling prediction*, International Journal of Material Forming, 2, S. 833–836,

DOI: 10.1007/s12289-009-0547-0.

(Abraham 2020)

Abraham, K. M. (2020), *How Comparable Are Sodium-Ion Batteries to Lithium-Ion Counterparts?*, ACS Energy Letters, 5 (11), S. 3544–3547, DOI: 10.1021/acsenergylett.0c02181.

(Arendes 2023)

Arendes, D. (2023), *Einführung in die Umformtechnik: Ein Lehrbuch zum Einstieg für Technikinteressierte*, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-42034-5.

(Barthel & Bold et al. 2022)

Barthel, H.; Bold, B.; Denkmann, V.; Fleischer, J.; Holl, K.; Korsmeier, A.; Schebesta, S.; Tenhaeff, K. & Wöhrle, T. (2022), *Vorrichtung und Verfahren zum Verdichten von auf einem Kollektorband aufgebrachtem Elektrodenmaterial*, (European Union Patent Nr. EP4016664A1), <https://patents.google.com/patent/EP4016664A1/de?oq=EP4016664A1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Bauer & Song et al. 2018)

Bauer, A.; Song, J.; Vail, S.; Pan, W.; Barker, J. & Lu, Y. (2018), *The Scale-up and Commercialization of Nonaqueous Na-Ion Battery Technologies*, Advanced Energy Materials, 8 (17), DOI: 10.1002/aenm.201702869.

(Baunach & Jaiser et al. 2016)

Baunach, M.; Jaiser, S.; Schmelzle, S.; Nirschl, H.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2016), *Delamination behavior of lithium-ion battery anodes: Influence of drying temperature during electrode processing*, Drying Technology, 34 (4), S. 462–473, DOI: 10.1080/07373937.2015.1060497.

(Beisel & Good 2005)

Beisel, J. A. & Good, J. K. (2005), *Analysis of trough formation and lateral steering of a web due to a tapered downstream roller*, Proceedings of the International Conference on Web Handling, Eighth International Conference on Web Handling (IWES), Stillwater, OK, USA, <https://shareok.org/handle/11244/321889> (zuletzt abgerufen am 20.03.2024).

(Birke & Weeber et al. 2022)

Birke, P.; Weeber, M. & Oberle, M. (2022), *Handbook on smart battery cell manufacturing: the power of digitalization*, World Scientific, Singapore, ISBN: 9789811245619.

(Bitsch & Dittmann et al. 2014)

Bitsch, B.; Dittmann, J.; Schmitt, M.; Scharfer, P.; Schabel, W. & Willenbacher, N. (2014), *A novel slurry concept for the fabrication of lithium-ion battery electrodes with beneficial properties*, Journal of Power Sources, 265, S. 81–90, DOI:

10.1016/j.jpowsour.2014.04.115.

(Bobba & Carrara et al. 2020)

Bobba, S.; Carrara, S.; Huisman, J.; Mathieux & Pavel, C. (2020), *Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study* (European Commission, Hrsg.), Publications Office of the European Union, Luxemburg, DOI: 10.2873/58081.

(Bold 2023)

Bold, B. (2023), *Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden - Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe DOI: 10.5445/IR/1000165052.

(Bold & Fleischer 2018)

Bold, B. & Fleischer, J. (2018), *Kalandrieren von Elektroden für Li-Ionen-Batterien*, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113 (9), S. 571–575, DOI: 10.3139/104.111968.

(Börger & Wenzl 2023)

Börger, A. & Wenzl, H. (2023), *Batterien: Grundlagen, Systeme, Anwendungen*, Wiley-VCH, Weinheim, ISBN: 978-3-527-69142-5.

(Boyano 2024)

Boyano, I. (2024, Juni 18), *HC anodes*, Persönliche Kommunikation.

(Brown 2008)

Brown, J. (2008), *Anatomy of a Wrinkle*, Association of International Metallizers Coaters and Laminators (AIMCAL), Applied Web Handling Conference, Minneapolis, MN, USA, ISBN: 978-1-61738-913-9.

(Budiman & Rahardian et al. 2022)

Budiman, B.; Rahardian, S.; Saputro, A.; Hidayat, A.; Pulung Nurprasetio, I. & Sambegoro, P. (2022), *Structural integrity of lithium-ion pouch battery subjected to three-point bending*, Engineering Failure Analysis, 138, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106307.

(Chen & Liu et al. 2013)

Chen, J.; Liu, J.; Qi, Y.; Sun, T. & Li, X. (2013), *Unveiling the Roles of Binder in the Mechanical Integrity of Electrodes for Lithium-Ion Batteries*, Journal of The Electrochemical Society, 160 (9), S. A1502–A1509, DOI: 10.1149/2.088309jes.

(Chen & Ou et al. 2011)

Chen, K.-S.; Ou, K.-S. & Liao, Y.-M. (2011), *On the influence of roller misalignments on the web behavior during roll-to-roll processing*, Journal of the Chinese

Institute of Engineers, 34 (1), S. 87–97, DOI: 10.1080/02533839.2011.552979.

(Chen & Xie et al. 2006)

Chen, L.; Xie, X.; Xie, J.; Wang, K. & Yang, J. (2006), *Binder effect on cycling performance of silicon/carbon composite anodes for lithium ion batteries*, Journal of Applied Electrochemistry, 36 (10), S. 1099–1104, DOI: 10.1007/s10800-006-9191-2.

(Converter Accessory Corporation o. J.)

Converter Accessory Corporation (o. J.), *Wrinkle Removal Systems*, <https://www.converteraccessory.com/prodlit/WS-pages%20entire.pdf> (zuletzt abgerufen am 19.03.2024).

(Coupeau & Durinck et al. 2024)

Coupeau, C.; Durinck, J. & Parry, G. (2024), *Buckling Structures, A Relevant Signature of the Mechanical Properties of Film/Substrate Systems*, Journal of Materials and Polymer Science, 4 (1), DOI: 10.47485/2832-9384.1046.

(Damour 2002)

Damour, J. (2002), *Thin Webs without Wrinkles*, Paper, Film & Foil CONVERTER (PFFC), 76 (10), S. 72–74, <http://www.redi-bw.de/db/ebsco.php/search.ebsco-host.com/login.aspx%3fdirect%3dtrue%26db%3dbuh%26AN%3d7685582%26site%3dehost-live> (zuletzt abgerufen am 19.03.2024).

(Devadas & Baragar et al. 1991)

Devadas, C.; Baragar, D.; Ruddle, G.; Samarasekera, I. V. & Hawbolt, E. B. (1991), *The thermal and metallurgical state of steel strip during hot rolling: Part II. Factors influencing rolling loads*, Metallurgical Transactions A, 22 (2), S. 321–333, DOI: 10.1007/BF02656801.

(Diener & Ivanov et al. 2022)

Diener, A.; Ivanov, S.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2022), *Evaluation of Deformation Behavior and Fast Elastic Recovery of Lithium-Ion Battery Cathodes via Direct Roll-Gap Detection During Calendering*, Energy Technology, 10 (4), DOI: 10.1002/ente.202101033.

(Dienst & Bischof et al. 2013)

Dienst, S.; Bischof, H.; Breineder, M.; Wokurek, M. & Steurer, I. (2013), *Breitstreckwalze*, (World Intellectual Property Organization Patent Nr. WO2013075883A1), <https://patents.google.com/patent/WO2013075883A1/de?oq=WO2013075883A1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(DIN 53362 2024)

DIN 53362:2003-10, *Prüfung von Kunststoff-Folien und von textilen Flächengebilden (außer Vliesstoffe), mit oder ohne Deckschicht aus Kunststoff -*

Bestimmung der Biegesteifigkeit - Verfahren nach Cantilever, (2024), Beuth Verlag GmbH, Berlin, DOI: 10.31030/9504254.

(DIN EN 28510-1 2014)

DIN EN 28510-1:2014-07, Klebstoffe - Schälprüfung für flexibel/starr geklebte Proben - Teil 1: 90°-Schälversuch; Deutsche Fassung EN 28510-1:2014, (2014), Beuth Verlag GmbH, Berlin, DOI: 10.31030/2141100.

(DIN EN ISO 4624 2023)

DIN EN ISO 4624:2023-09, Beschichtungsstoffe - Abreißversuch zur Bestimmung der Haftfestigkeit (ISO 4624:2023); Deutsche Fassung EN ISO 4624:2023, (2023), Beuth Verlag GmbH, Berlin, DOI: 10.31030/3475823.

(DIN EN ISO 8295 2004)

DIN EN ISO 8295:2004-10, Kunststoffe - Folien und Bahnen - Bestimmung der Reibungskoeffizienten (ISO 8295:1995); Deutsche Fassung EN ISO 8295:2004, (2004), Beuth Verlag GmbH, Berlin, DOI: 10.31030/9573070.

(DIN EN ISO 8510-2 2010)

DIN EN ISO 8510-2:2010-12, Klebstoffe - Schälprüfung für flexibel/starr geklebte Proben - Teil 2: 180-Grad-Schälversuch (ISO 8510-2:2006); Deutsche Fassung EN ISO 8510-2:2010, (2010), Beuth Verlag GmbH, Berlin, DOI: 10.31030/3475823.

(DIN EN ISO 20502 2016)

DIN EN ISO 20502:2016-11, Hochleistungskeramik - Bestimmung der Haftung von keramischen Schichten mit dem Ritztest (ISO 20502:2005 einschließlich Cor 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 20502:2016, (2016), Beuth Verlag GmbH, Berlin, DOI: 10.31030/2475545.

(Dixon & Yuen 2008)

Dixon, A. & Yuen, W. Y. D. (2008), *Crease formation in the processing of thin web material*, Australian Journal of Mechanical Engineering, 6 (2), S. 95–100, DOI: 10.1080/14484846.2008.11464562.

(Dorrman & Sann-Ferro et al. 2021)

Dorrman; Sann-Ferro, K.; Heininger & Mähliß, J. (2021), *Kompendium: Li-Ionen-Batterien*, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V, Frankfurt am Main, <https://www.dke.de/resource/blob/933404/fa7a24099c84ef613d8e7af2c860a39/kompendium-li-ionen-batterien-data.pdf> (zuletzt abgerufen am 08.02.2024).

(Dreger & Haselrieder et al. 2019)

Dreger, H.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2019), *Influence of dispersing by extrusion and calendering on the performance of lithium-ion battery electrodes*,

Journal of Energy Storage, 21, S. 231–240, DOI: 10.1016/j.est.2018.11.028.

(Duffner & Kronemeyer et al. 2021)

Duffner, F.; Kronemeyer, N.; Tübke, J.; Leker, J.; Winter, M. & Schmuck, R. (2021), *Post-lithium-ion battery cell production and its compatibility with lithium-ion cell production infrastructure*, Nature Energy, 6, DOI: 10.1038/s41560-020-00748-8.

(Eizo & Yutaka et al. 2000)

Eizo K.; Yutaka S. & Masujiro S. (2000), *Manufacturing method of magnetic recording medium*, (Japan Patent Nr. JP3080720B2), <https://patents.google.com/patent/JP3080720B2/en?oq=JP3080720B2> (zuletzt abgerufen am 19.03.2024).

(European Commission 2020)

European Commission, D. I. M. I. E. and Sme. (2020), *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*, (COM (2020) 474), Brussels, <https://www.europeansources.info/record/critical-raw-materials-resilience-charting-a-path-towards-greater-security-and-sustainability/> (zuletzt abgerufen am 08.02.2024).

(Fichtner 2022)

Fichtner, M. (2022), *Recent Research and Progress in Batteries for Electric Vehicles, Batteries & Supercaps*, 5 (2), DOI: 10.1002/batt.202100224.

(Fischer & Rammerstorfer et al. 2003)

Fischer, F. D.; Rammerstorfer, F. G. & Friedl, N. (2003), *Residual Stress-Induced Center Wave Buckling of Rolled Strip Metal*, Journal of Applied Mechanics, 70 (1), S. 84–90, DOI: 10.1115/1.1532322.

(Flores-Johnson & Rupert et al. 2015)

Flores-Johnson, E. A.; Rupert, T. J.; Hemker, K. J.; Gianola, D. S. & Gan, Y. (2015), *Modelling wrinkling interactions produced by patterned defects in metal thin films*, Extreme Mechanics Letters, 4, S. 175–185, DOI: 10.1016/j.eml.2015.07.002.

(Fricke & Günzel et al. 2022)

Fricke, A.; Günzel, D. & Schaeffer, T. (2022), *Bewegungstechnik: Konzipieren und Auslegen von mechanischen Getrieben*, (3., aktualisierte Auflage), Hanser, München, ISBN: 978-3-446-46859-7.

(Friedl & Rammerstorfer et al. 2000)

Friedl, N.; Rammerstorfer, F. G. & Fischer, F. D. (2000), *Buckling of stretched strips*, Computers & Structures, 78 (1), S. 185–190, DOI: 10.1016/S0045-7949(00)00072-9.

(Frieske & Huber et al. 2022)

Frieske, B.; Huber, A.; Stieler, S. & Mendler, L. (2022), *Studie: Zukunftsähige Lieferketten und neue Wertschöpfungsstrukturen in der Automobilindustrie*, e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, Stuttgart, https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Studie_Zukunftsfaehige_Lieferketten_und_neue_Wertschoepfungsstrukturen_in_der_Automobilindustrie.pdf (zuletzt abgerufen am 08.02.2024).

(Fritz & Schmütz 2022)

Fritz, A. H. & Schmütz, J. (2022), *Fertigungstechnik*, (A. H. Fritz & J. Schmütz, Hrsg.; 13. Auflage), Springer Vieweg, Berlin; Heidelberg, ISBN: 978-3-662-64874-2.

(Fujita 2014)

Fujita H. (2014), *Device for manufacturing electrode for cell and process of manufacturing electrode*, (Japan Patent Nr. JP2014123491A), <https://patents.google.com/patent/JP2014123491A/en?oq=JP2014123491A> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Gaikwad & Arias 2017)

Gaikwad, A. M. & Arias, A. C. (2017), *Understanding the Effects of Electrode Formulation on the Mechanical Strength of Composite Electrodes for Flexible Batteries*, ACS Applied Materials & Interfaces, 9 (7), S. 6390–6400, DOI: 10.1021/acsami.6b14719.

(Gaskell 2021)

Gaskell, R. E. (2021), *The Calendering of Plastic Materials*, Journal of Applied Mechanics, 17 (3), S. 334–336, DOI: 10.1115/1.4010136.

(Genthe 2012)

Genthe, K. (2012), *Streckwalze für dünne bahnförmige Materialien*, (European Union Patent Nr. EP2405048A1), <https://patents.google.com/patent/EP2405048A1/de?oq=EP2405048A1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(GOM mbH 2014)

GOM mbH (2014), *ATOS Core Optical 3D Scanner*, <https://www.3dteam.pl/wp-content/uploads/2020/11/ATOS-Core.pdf> (zuletzt abgerufen am 08.02.2024).

(Good & Kedl et al. 1997)

Good, J. K.; Kedl, D. M. & Shelton, J. J. (1997), *Shear wrinkling in isolated spans*, Proceedings of the International Conference on Web Handling, Fourth International Conference on Web Handling (IWEB), Stillwater, OK, USA, <https://shareok.org/handle/11244/321718> (zuletzt abgerufen am 23.03.2024).

(Grabmann & Kriegler et al. 2022)

Grabmann, S.; Kriegler, J.; Harst, F.; Günter, F. J. & Zaeh, M. F. (2022), *Laser welding of current collector foil stacks in battery production—mechanical properties of joints welded with a green high-power disk laser*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 118 (7), S. 2571–2586, DOI: 10.1007/s00170-021-07839-0.

(Grima Cintas 2012)

Grima Cintas, P. (2012), *Industrial statistics with Minitab*, (J. Tort-Martorell Llabres & L. Marco-Almagro, Hrsg.), Wiley, Chichester, West Sussex, United Kingdom, ISBN: 0-470-97275-0.

(Guigon & Simon et al. 2007)

Guigon, P.; Simon, O.; Saleh, K.; Bindhumadhavan, G.; J. Adams, M. & Seville, J. P. K. (2007), *Chapter 5 Roll pressing*, In A. D. Salmon, M. J. Hounslow, & J. P. K. Seville (Hrsg.), *Granulation: Bd. v. 11* (1st ed., S. 255–288), Elsevier, Amsterdam; Boston, ISBN: 978-0-444-51871-2.

(Gulbinska 2014)

Gulbinska, M. K. (2014), *Lithium-ion battery materials and engineering: current topics and problems from the manufacturing perspective*, Springer, London, ISBN: 978-1-4471-6548-4.

(Günther 2023)

Günther, T. (2023), *Untersuchungen zu Fehlern beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Elektroden*, Dissertation, TUM School of Engineering and Design, München <https://mediatum.ub.tum.de/1692541> (zuletzt abgerufen am 08.02.2024).

(Günther & Billot et al. 2016)

Günther, T.; Billot, N.; Schuster, J.; Schnell, J.; Spingler, F. B. & Gasteiger, H. A. (2016), *The Manufacturing of Electrodes: Key Process for the Future Success of Lithium-Ion Batteries*, Advanced Materials Research, 1140, S. 304–311, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1140.304.

(Günther & Schreiner et al. 2020)

Günther, T.; Schreiner, D.; Metkar, A.; Meyer, C.; Kwade, A. & Reinhart, G. (2020), *Classification of Calendering-Induced Electrode Defects and Their Influence on Subsequent Processes of Lithium-Ion Battery Production*, Energy Technology, 8 (2), DOI: 10.1002/ente.201900026.

(Gupta & Üçel et al. 2020)

Gupta, P.; Üçel, İ. B.; Gudmundson, P. & Olsson, E. (2020), *Characterization of the Constitutive Behavior of a Cathode Active Layer in Lithium-Ion Batteries Using a Bending Test Method*, Experimental Mechanics, 60 (6), S. 847–860, DOI: 10.1007/s11340-020-00613-5.

(Hasan & Islam et al. 2023)

Hasan, S.; Islam, Md. S.; Bashar, S. M. A.; Tamzid, A. A. N.; Hossain, R. B.; Haque, M. A. & Faishal, R. (2023), *Beyond Lithium-Ion: The Promise and Pitfalls of BYD's Blade Batteries for Electric Vehicles*, E3S Web of Conferences, 469, DOI: 10.1051/e3sconf/202346900005.

(Haselrieder 2017)

Haselrieder, W. (2017), *Kalandrierung zur gezielten Einstellung der Batterieelektroden-Performance*, Dissertation, TU Braunschweig, Göttingen <https://www.sierke-verlag.de/produkt/kalandrierung-zur-gezielten-einstellung-der-batterieelektroden-performance/> (zuletzt abgerufen am 08.02.2024).

(Haselrieder & Ivanov et al. 2013)

Haselrieder, W.; Ivanov, S.; Christen, D. K.; Bockholt, H. & Kwade, A. (2013), *Impact of the Calendering Process on the Interfacial Structure and the Related Electrochemical Performance of Secondary Lithium-Ion Batteries*, ECS Transactions, 50 (26), S. 59–70, DOI: 10.1149/05026.0059ecst.

(Haselrieder & Westphal et al. 2015)

Haselrieder, W.; Westphal, B.; Bockholt, H.; Diener, A.; Höft, S. & Kwade, A. (2015), *Measuring the coating adhesion strength of electrodes for lithium-ion batteries*, International Journal of Adhesion and Adhesives, 60, S. 1–8, DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.03.002.

(Healey & Li et al. 2013)

Healey, T. J.; Li, Q. & Cheng, R.-B. (2013), *Wrinkling Behavior of Highly Stretched Rectangular Elastic Films via Parametric Global Bifurcation*, Journal of Nonlinear Science, 23 (5), S. 777–805, DOI: 10.1007/s00332-013-9168-3.

(Herrmann 1973)

Herrmann, W. (1973), *Das Verdichten von Pulvern zwischen zwei Walzen: Einflußgrößen, theoret. Ansätze, Meßmethoden, Auslegung von Walzenpressen. Literaturbericht aus dem Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe*, Verlag Chemie, Weinheim, ISBN: 3-527-25547-8.

(Hessenbruch 2017)

Hessenbruch, R. (2017), *Spreizwalze zum seitlichen Ausbreiten einer flächigen Materialbahn, Verfahren zum Spreizen einer flächigen Materialbahn sowie Vorrichtung zum Handhaben von flächigen Materialbahnen*, (Deutschland Patent Nr. DE102016005546A1), <https://patents.google.com/patent/DE102016005546A1/de?oq=DE102016005546A1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Honold & Erkelenz 2015)

Honold, J. & Erkelenz, M. (2015), *Breitstreckwalze*, (World Intellectual Property Organization Patent Nr. WO2015104362A1),

<https://patents.google.com/patent/WO2015104362A1/de> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Honold & Erkelenz 2020)

Honold, J. & Erkelenz, M. (2020), *Breitstreckwalze*, (European Union Patent Nr. EP3094778B1), <https://patents.google.com/patent/EP3094778B1/de> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Hornbogen & Warlimont et al. 2019)

Hornbogen, E.; Warlimont, H. & Skrotzki, B. (2019), *Metalle: Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-57762-2.

(Hotta 2009)

Hotta M. (2009), *Conveying device*, (Japan Patent Nr. JP2009280355A), <https://patents.google.com/patent/JP2009280355A/en?oq=JP2009280355A> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Huang & Hu et al. 2015)

Huang, Q.; Hu, H.; Yu, K.; Potier-Ferry, M.; Belouettar, S. & Damil, N. (2015), *Macroscopic simulation of membrane wrinkling for various loading cases*, International Journal of Solids and Structures, 64–65, S. 246–258, DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2015.04.003.

(Huang & Yang et al. 2020)

Huang, Q.; Yang, J.; Huang, W.; Giunta, G.; Belouettar, S. & Hu, H. (2020), *The boundary effects on stretch-induced membrane wrinkling*, Thin-Walled Structures, 154, DOI: 10.1016/j.tws.2020.106838.

(Huttner & Diener et al. 2021)

Huttner, F.; Diener, A.; Heckmann, T.; Eser, J. C.; Abali, T.; Mayer, J. K.; Scharfer, P.; Schabel, W. & Kwade, A. (2021), *Increased Moisture Uptake of NCM622 Cathodes after Calendering due to Particle Breakage*, Journal of The Electrochemical Society, 168 (9), S. 090539, DOI: 10.1149/1945-7111/ac24bb.

(Iijima & Mbara et al. 2005)

Iijima H.; Mbara K. & Seki A. (2005), *Method and apparatus for coating traveling web with coating solution, method for adjusting width direction film thickness profile and method for correcting wrinkles of web*, (Japan Patent Nr. JP2005137983A), <https://patents.google.com/patent/JP2005137983A/en?oq=JP2005137983A> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Ishida & Tada 2012)

Ishida I. & Tada K. (2012), *Electrode material roll press facility*, (Japan Patent Nr. JP2012129147A),

<https://patents.google.com/patent/JP2012129147A/en?oq=JP2012129147A>
(zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(ISO 5628 2019)

ISO 5628 - 2019-05 - Papier und Pappe - Bestimmung der Biegesteifigkeit- Allgemeine Grundsätze für das Zwei-Punkt, Drei-Punkt und Vier-Punkt-Verfahren, (2019), Berlin <https://www.dinmedia.de/de/norm/iso-5628/308791586> (zuletzt abgerufen am 15.05.2024).

(Jacques & Elias et al. 2007)

Jacques, N.; Elias, A.; Potier-Ferry, M. & Zahrouni, H. (2007), *Buckling and wrinkling during strip conveying in processing lines*, Journal of Materials Processing Technology, 190 (1), S. 33–40, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.117.

(Jacques & Potier-Ferry 2005)

Jacques, N. & Potier-Ferry, M. (2005), *On mode localisation in tensile plate buckling*, Comptes Rendus Mécanique, 333 (11), S. 804–809, DOI: 10.1016/j.crme.2005.10.013.

(Jarvis & Macklin et al. 2001)

Jarvis, C. R.; Macklin, W. J.; Macklin, A. J.; Mattingley, N. J. & Kronfli, E. (2001), *Use of grafted PVdF-based polymers in lithium batteries*, Journal of Power Sources, 97–98, S. 664–666, DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00696-6.

(Jeong & Lee 2014)

Jeong, D. & Lee, J. (2014), *Electrode design optimization of lithium secondary batteries to enhance adhesion and deformation capabilities*, Energy, 75, S. 525–533, DOI: 10.1016/j.energy.2014.08.013.

(Jokinen 1998)

Jokinen, K. (1998), *A roller for guiding movable web*, (World Intellectual Property Organization Patent Nr. WO1998012381A1), <https://patents.google.com/patent/WO1998012381A1/en> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Jones 2021)

Jones, D. P. (2021), *A new approach to predicting web wrinkling*, Proceedings of the 2021 International Conference on Micro- and Nano-devices Enabled by R2R Manufacturing, Austin, TX, USA, 15.12. –17.12.2021, <https://nascent.utexas.edu/sites/default/files/Jones-19-TA2.3.pdf> (zuletzt abgerufen am 08.02.2024).

(Kaiser & Wenzel et al. 2014)

Kaiser, J.; Wenzel, V.; Nirschl, H.; Bitsch, B.; Willenbacher, N.; Baunach, M.; Schmitt, M.; Jaiser, S.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2014), *Prozess- und Produktentwicklung von Elektroden für Li-Ionen-Zellen*, Chemie Ingenieur Technik, 86

(5), S. 695–706, DOI: 10.1002/cite.201300085.

(Kampker 2014)

Kampker, A. (2014), *Elektromobilproduktion*, (C. Nowacki, Hrsg.), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-642-42022-1.

(Kampker & Heimes 2024)

Kampker, A., & Heimes, H. H. (Hrsg.) (2024), *Elektromobilität: Grundlagen einer Fortschrittstechnologie*, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-65811-6.

(Kang & Lim et al. 2017)

Kang, H.; Lim, C.; Li, T.; Fu, Y.; Yan, B.; Houston, N.; Andrade, V.; Carlo, F. & Zhu, L. (2017), *Geometric and Electrochemical Characteristics of LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O₂ Electrode with Different Calendering Conditions*, *Electrochimica Acta*, 232, S. 431–438, DOI: 10.1016/j.electacta.2017.02.151.

(Katsuhiko & Shigeru 2016)

Katsuhiko Y. & Shigeru M. (2016), *Roll press machine with wrinkle prevention device and roll press method*, (Japan Patent Nr. JP6027701B1), <https://patents.google.com/patent/JP6027701B1/en?oq=JP6027701B1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Kehrer & Locke et al. 2021)

Kehrer, M.; Locke, M.; Offermanns, C.; Heimes, H. & Kampker, A. (2021), *Analysis of Possible Reductions of Rejects in Battery Cell Production during Switch-On and Operating Processes*, *Energy Technology*, 9 (7), DOI: 10.1002/ente.202001113.

(Keshavarzi & Gilaki et al. 2022)

Keshavarzi, M. M.; Gilaki, M. & Sahraei, E. (2022), *Characterization of in-situ material properties of pouch lithium-ion batteries in tension from three-point bending tests*, *International Journal of Mechanical Sciences*, 219, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107090.

(Kim & Zhuge et al. 2020)

Kim, J.; Zhuge, H.; Hyunsoo, J. & Seongjae, K. (2020), *Apparatus for pressing electrode of secondary battery*, (Südkorea Patent Nr. KR102187241B1), <https://patents.google.com/patent/KR102187241B1/en?oq=KR102187241B1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Klemens & Wurba et al. 2023)

Klemens, J.; Wurba, A.-K.; Burger, D.; Müller, M.; Bauer, W.; Büchele, S.; Leonet, O.; Blázquez, J. A.; Boyano, I.; Ayerbe, E.; Ehrenberg, H.; Fleischer, J.; Smith, A.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2023), *Challenges and Opportunities for Large-Scale Electrode Processing for Sodium-Ion and Lithium-Ion Battery*, *Batteries &*

Supercaps, 6 (11), DOI: 10.1002/batt.202300291.

(Knight 1975)

Knight, J. B. (1975), *Apparatus for spreading tows of fibrous materials*, (United States Patent Nr. US3874030A), <https://patents.google.com/patent/US3874030A/en?oq=US3874030> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Knoche & Zinth et al. 2016)

Knoche, T.; Zinth, V.; Schulz, M.; Schnell, J.; Gilles, R. & Reinhart, G. (2016), *In situ visualization of the electrolyte solvent filling process by neutron radiography*, Journal of Power Sources, 331, S. 267–276, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.09.037.

(Komoda & Ishibashi et al. 2023)

Komoda, Y.; Ishibashi, K.; Kuratani, K.; Suzuki, K.; Ohmura, N. & Kobayashi, H. (2023), *Effects of drying rate and slurry microstructure on the formation process of LiB cathode and electrochemical properties*, Journal of Power Sources, 568, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.232983.

(König & Nicoletti et al. 2021)

König, A.; Nicoletti, L.; Schröder, D.; Wolff, S.; Waclaw, A. & Lienkamp, M. (2021), *An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles*, World Electric Vehicle Journal, 12 (1), DOI: 10.3390/wevj12010021.

(Kopsch 1978)

Kopsch, H. (1978), *Kalandertechnik: Mit 217 Bildern und 68 Tab*, (1. Aufl.), Hanser, München, ISBN: 3-446-12395-4.

(Koren 1995)

Koren, E. (1995), *Lamellenring, insbesondere für Breitstreckwalzen, sowie damit versehene Einrichtung zur Führung bahnförmiger Materialien und Verfahren zu deren Herstellung*, (European Union Patent Nr. EP0663363A1), <https://patents.google.com/patent/EP0663363A1/de?oq=EP0663363A1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Korthauer & Pettinger 2013)

Korthauer, R. & Pettinger, K.-H. (2013), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-642-30653-2.

(Kumberg 2022)

Kumberg, J. (2022), *About Drying of Hierarchically Structured Electrodes for High Energy Li-Ion Battery Applications*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe DOI: 10.5445/IR/1000150177.

(Kurzweil & Dietlmeier 2018)

Kurzweil, P. & Dietlmeier, O. K. (2018), *Elektrochemische Speicher:*

Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen, (2., aktualisierte und erweiterte Auflage), Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-21829-4.

(Kwade & Haselrieder et al. 2018)

Kwade, A.; Haselrieder, W.; Leithoff, R.; Modlinger, A.; Dietrich, F. & Droeder, K. (2018), *Current status and challenges for automotive battery production technologies*, Nature Energy, 3 (4), S. 290–300, DOI: 10.1038/s41560-018-0130-3.

(Lange 1988)

Lange, K. (Hrsg.) (1988), *Umformtechnik*, (2., völlig neubearb. und erw. Aufl.), Springer, Berlin; Heidelberg, ISBN: 3-540-17709-4.

(Läpple 2011)

Läpple, V. (2011), *Einführung in die Festigkeitslehre*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-1605-4.

(Leonet 2024)

Leonet, O. (2024, Mai 31), *HC anodes*, Persönliche Kommunikation.

(Li & Huang et al. 2019)

Li, G.; Huang, B.; Pan, Z.; Su, X.; Shao, Z. & An, L. (2019), *Advances in three-dimensional graphene-based materials: configurations, preparation and application in secondary metal (Li, Na, K, Mg, Al)-ion batteries*, Energy & Environmental Science, 12 (7), S. 2030–2053, DOI: 10.1039/C8EE03014F.

(Li & Lewis et al. 2006)

Li, J.; Lewis, R. B. & Dahn, J. R. (2006), *Sodium Carboxymethyl Cellulose: A Potential Binder for Si Negative Electrodes for Li-Ion Batteries*, Electrochemical and Solid-State Letters, 10 (2), S. A17, DOI: 10.1149/1.2398725.

(Liu & Zhang et al. 2021)

Liu, Y.; Zhang, R.; Wang, J. & Wang, Y. (2021), *Current and future lithium-ion battery manufacturing*, iScience, 24 (4), DOI: 10.1016/j.isci.2021.102332.

(Lorbach 2024)

Lorbach, D. (2024, April 17), *Dämpferkonstante*, Persönliche Kommunikation.

(Lu & Daemi et al. 2020)

Lu, X.; Daemi, S. R.; Bertei, A.; Kok, M. D. R.; O'Regan, K. B.; Rasha, L.; Park, J.; Hinds, G.; Kendrick, E.; Brett, D. J. L. & Shearing, P. R. (2020), *Microstructural Evolution of Battery Electrodes During Calendering*, Joule, 4 (12), S. 2746–2768, DOI: 10.1016/j.joule.2020.10.010.

(Luo & Zhu et al. 2018)

Luo, H.; Zhu, J.; Sahraei, E. & Xia, Y. (2018), *Adhesion strength of the cathode*

in lithium-ion batteries under combined tension/shear loadings, RSC Advances, 8 (8), S. 3996–4005, DOI: 10.1039/C7RA12382E.

(Luo & Tan et al. 2017)

Luo P.; Tan D.; Wu H. & Sun Z. (2017), *Sheet flattening device*, (China Patent Nr. CN104444519B), <https://patents.google.com/patent/CN104444519B/en?oq=CN104444519B> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Mahmoodkhani & Wells et al. 2017)

Mahmoodkhani, Y.; Wells, M. A. & Song, G. (2017), *Prediction of roll force in skin pass rolling using numerical and artificial neural network methods*, Ironmaking & Steelmaking, 44 (4), S. 281–286, DOI: 10.1080/03019233.2016.1210405.

(Matsutani 2001)

Matsutani S. (2001), *Spreader*, (Japan Patent Nr. JP2001038277A), <https://patents.google.com/patent/JP2001038277A/en?oq=JP2001038277A> (zuletzt abgerufen am 19.03.2024).

(Mauler & Duffner et al. 2021)

Mauler, L.; Duffner, F.; Zeier, W. G. & Leker, J. (2021), *Battery cost forecasting: a review of methods and results with an outlook to 2050*, Energy & Environmental Science, 14 (9), S. 4712–4739, DOI: 10.1039/D1EE01530C.

(Mayer & Wurba et al. 2021)

Mayer, D.; Wurba, A.-K.; Bold, B.; Bernecker, J.; Smith, A. & Fleischer, J. (2021), *Investigation of the Mechanical Behavior of Electrodes after Calendering and Its Influence on Singulation and Cell Performance*, Processes, 9 (11), DOI: 10.3390/pr9112009.

(Mayr & Schreiner et al. 2022)

Mayr, A.; Schreiner, D.; Stumper, B. & Daub, R. (2022), *In-line Sensor-based Process Control of the Calendering Process for Lithium-Ion Batteries*, Procedia CIRP, 107, S. 295–301, DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.048.

(McIntosh & Thisse 1988)

McIntosh, B. R. & Thisse, T. R. (1988), *Spreader roll*, (United States Patent Nr. US4716637A), <https://patents.google.com/patent/US4716637A/en> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Meyer & Bockholt et al. 2017)

Meyer, C.; Bockholt, H.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2017), *Characterization of the calendering process for compaction of electrodes for lithium-ion batteries*, Journal of Materials Processing Technology, 249, S. 172–178, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.031.

(Meyer & Kosfeld et al. 2018)

Meyer, C.; Kosfeld, M.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2018), *Process modeling of the electrode calendering of lithium-ion batteries regarding variation of cathode active materials and mass loadings*, Journal of Energy Storage, 18, S. 371–379, DOI: 10.1016/j.est.2018.05.018.

(Meyer & Weyhe et al. 2020)

Meyer, C.; Weyhe, M.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2020), *Heated Calendering of Cathodes for Lithium-Ion Batteries with Varied Carbon Black and Binder Contents*, Energy Technology, 8 (2), S. 1900175, DOI: 10.1002/ente.201900175.

(Michaelis & Schütrumpf et al. 2023)

Michaelis, S.; Schütrumpf, J.; Kampker, A.; Heimes, H.; Dorn, B.; Wennemar, S.; Scheibe, A.; VDMA Verlag; et al. (2023, Januar 1), *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2023.*, Frankfurt am Main, <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/441370>.

(Mohammadi & Saif 2023)

Mohammadi, F. & Saif, M. (2023), *A comprehensive overview of electric vehicle batteries market*, e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 3, DOI: 10.1016/j.prime.2023.100127.

(Naefe 2018)

Naefe, P. (2018), *Methodisches Konstruieren: Auf den Punkt gebracht*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-22635-0.

(Ngandjong & Lombardo et al. 2021)

Ngandjong, A. C.; Lombardo, T.; Primo, E. N.; Chouchane, M.; Shodiev, A.; Arcelus, O. & Franco, A. A. (2021), *Investigating electrode calendering and its impact on electrochemical performance by means of a new discrete element method model: Towards a digital twin of Li-Ion battery manufacturing*, Journal of Power Sources, 485, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.229320.

(Noelle & Wang et al. 2018)

Noelle, D. J.; Wang, M. & Qiao, Y. (2018), *Improved safety and mechanical characterizations of thick lithium-ion battery electrodes structured with porous metal current collectors*, Journal of Power Sources, 399, S. 125–132, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.076.

(Overhagen 2018)

Overhagen, C. (2018), *Modelle zum Walzen von Flach- und Vollquerschnitten*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Essen https://due-publico2.uni-due.de/receive/duepublico_mods_00047540 (zuletzt abgerufen am 08.02.2024).

(Parikh 2005)

Parikh, D. M. (Hrsg.) (2005), *Handbook of pharmaceutical granulation technology*, (2. ed., Bd. 154), Taylor & Francis, NewYork, ISBN: 0-8247-2647-2.

(Podlesny & Schneiders 2010)

Podlesny, M. & Schneiders, K.-H. (2010), *Breitstreckwalze mit aufgerauter, wendelförmiger Oberfläche*, (Deutschland Patent Nr. DE102008042690A1), <https://patents.google.com/patent/DE102008042690A1/de?oq=DE102008042690A1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Rammerstorfer 2018)

Rammerstorfer, F. G. (2018), *Buckling of elastic structures under tensile loads*, Acta Mechanica, 229 (2), S. 881–900, DOI: 10.1007/s00707-017-2006-1.

(Rammerstorfer & Fischer et al. 2001)

Rammerstorfer, F. G.; Fischer, F. D. & Friedl, N. (2001), *Buckling of Free Infinite Strips Under Residual Stresses and Global Tension*, Journal of Applied Mechanics, 68 (3), S. 399–404, DOI: 10.1115/1.1357519.

(Rantapää & Huirinainen et al. 2013)

Rantapää, M.; Huirinainen, K.; Schäfer, T. & Holappa, K. (2013), *Curved roll and its operating arrangement*, (World Intellectual Property Organization Patent Nr. WO2013167809A1), <https://patents.google.com/patent/WO2013167809A1/en> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Rauscher 2014)

Rauscher, S. (2014), *Einfluss von Material- und Beschichtungsparametern auf die Elektrodenmorphologie und die Leistungsparameter von Lithiumionen-Zellen*, Dissertation, Universität Ulm, Ulm <http://dx.doi.org/10.18725/OPARU-2647>.

(Riefenstahl 2010)

Riefenstahl, U. (2010), *Elektrische Antriebssysteme*, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-1331-2.

(Roisum 1996)

Roisum, D. R. (1996), *The mechanics of wrinkling*, Tappi Journal, 79 (10), S. 217–226,.

(Roisum 2016)

Roisum, D. R. (2016), *16 - Web Handling and Winding*, In J. R. Wagner (Hrsg.), *Multilayer Flexible Packaging (Second Edition)* (S. 257–278), Imprint William Andrew Publishing, London, ISBN: 978-0-323-37100-1.

(Rosenberger & Rosner et al. 2024)

Rosenberger, N.; Rosner, P.; Bilfinger, P.; Schöberl, J.; Teichert, O.; Schneider,

J.; Abo Gamra, K.; Allgäuer, C.; Dietermann, B.; Schreiber, M.; Ank, M.; Kröger, T.; Köhler, A. & Lienkamp, M. (2024), *Quantifying the State of the Art of Electric Powertrains in Battery Electric Vehicles: Comprehensive Analysis of the Tesla Model 3 on the Vehicle Level*, World Electric Vehicle Journal, 15 (6), DOI: 10.3390/wevj15060268.

(Röthemeyer 2013)

Röthemeyer, F. (2013), *Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen durch Kalandrieren*, In F. Röthemeyer & F. Sommer (Hrsg.), *Kautschuk Technologie* (S. 603–655), Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, ISBN: 978-3-446-43776-0.

(Rudola & Rennie et al. 2021)

Rudola, A.; Rennie, A. J. R.; Heap, R.; Meysami, S. S.; Lowbridge, A.; Mazzali, F.; Sayers, R.; Wright, C. J. & Barker, J. (2021), *Commercialisation of high energy density sodium-ion batteries: Faradion's journey and outlook*, Journal of Materials Chemistry A, 9 (13), S. 8279–8302, DOI: 10.1039/D1TA00376C.

(Ryu & Sun et al. 2021)

Ryu, H.-H.; Sun, H. H.; Myung, S.-T.; Yoon, C. S. & Sun, Y.-K. (2021), *Reducing cobalt from lithium-ion batteries for the electric vehicle era*, Energy & Environmental Science, 14 (2), S. 844–852, DOI: 10.1039/D0EE03581E.

(Sainio & Peglow et al. 2001)

Sainio, J. W.; Peglow, C. J. & Lasecki, A. D. (2001), *Anti-wrinkle system for a web offset press*, (United States Patent Nr. US6250220B1), <https://patents.google.com/patent/US6250220B1/en?oq=US6250220B1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Sangrós Giménez & Finke et al. 2019)

Sangrós Giménez, C.; Finke, B.; Schilde, C.; Froböse, L. & Kwade, A. (2019), *Numerical simulation of the behavior of lithium-ion battery electrodes during the calendaring process via the discrete element method*, Powder Technology, 349, S. 1–11, DOI: 10.1016/j.powtec.2019.03.020.

(Sangrós Giménez & Schilde et al. 2020)

Sangrós Giménez, C.; Schilde, C.; Froböse, L.; Ivanov, S. & Kwade, A. (2020), *Mechanical, Electrical, and Ionic Behavior of Lithium-Ion Battery Electrodes via Discrete Element Method Simulations*, Energy Technology, 8 (2), S. 1900180, DOI: 10.1002/ente.201900180.

(SAUERESSIG GmbH + Co. KG 2013)

SAUERESSIG GmbH + Co. KG (2013), *Betriebsanleitung GKL 500 MS.*

(Schilcher & Meyer et al. 2016)

Schilcher, C.; Meyer, C. & Kwade, A. (2016), *Structural and Electrochemical*

Properties of Calendered Lithium Manganese Oxide Cathodes, Energy Technology, 4 (12), S. 1604–1610, DOI: 10.1002/ente.201600130.

(Schilling & Schmitt et al. 2016)

Schilling, A.; Schmitt, J.; Dietrich, F. & Dröder, K. (2016), *Analyzing Bending Stresses on Lithium-Ion Battery Cathodes induced by the Assembly Process*, Energy Technology, 4 (12), S. 1502–1508, DOI: 10.1002/ente.201600131.

(Schmitt & Posselt et al. 2015)

Schmitt, J.; Posselt, G.; Dietrich, F.; Thiede, S.; Raatz, A.; Herrmann, C. & Dröder, K. (2015), *Technical Performance and Energy Intensity of the Electrode-Separator Composite Manufacturing Process*, Procedia CIRP, 29, S. 269–274, DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.016.

(Schmoock 1990)

Schmoock, H. (1990), *Breitstreckenwalze*, (Deutschland Patent Nr. DE3903161A1), <https://patents.google.com/patent/DE3903161A1/de?oq=DE3903161A1> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Shawn Lee & Hyung Kim et al. 2013)

Shawn Lee, S.; Hyung Kim, T.; Jack Hu, S.; Cai, W. W.; Abell, J. A. & Li, J. (2013), *Characterization of Joint Quality in Ultrasonic Welding of Battery Tabs*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 135 (2), DOI: 10.1115/1.4023364.

(Sheng & Fell et al. 2014)

Sheng, Y.; Fell, C. R.; Son, Y. K.; Metz, B. M.; Jiang, J. & Church, B. C. (2014), *Effect of Calendering on Electrode Wettability in Lithium-Ion Batteries*, Frontiers in Energy Research, 2, DOI: 10.3389/fenrg.2014.00056.

(Siebertz & van Bebber et al. 2017)

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplanaung: Design of Experiments (DoE)*, (2. Aufl. 2017), Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-55743-3.

(Sipos & Fehér 2016)

Sipos, A. A. & Fehér, E. (2016), *Disappearance of stretch-induced wrinkles of thin sheets: A study of orthotropic films*, International Journal of Solids and Structures, 97–98, S. 275–283, DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2016.07.021.

(Slater & Kim et al. 2013)

Slater, M. D.; Kim, D.; Lee, E. & Johnson, C. S. (2013), *Sodium-Ion Batteries, Advanced Functional Materials*, 23 (8), S. 947–958, DOI: 10.1002/adfm.201200691.

(Smith & Treacher et al. 2017)

Smith, K.; Treacher, J.; Ledwoch, D.; Adamson, P. & Kendrick, E. (2017), *Novel*

High Energy Density Sodium Layered Oxide Cathode Materials: from Material to Cells, ECS Transactions, 75 (22), S. 13–24, DOI: 10.1149/07522.0013ecst.

(Son & Ryou et al. 2014)

Son, B.; Ryou, M.-H.; Choi, J.; Lee, T.; Yu, H. K.; Kim, J. H. & Lee, Y. M. (2014), *Measurement and analysis of adhesion property of lithium-ion battery electrodes with SAICAS*, ACS Applied Materials & Interfaces, 6 (1), S. 526–531, DOI: 10.1021/am404580f.

(Suzuki & Ishida et al. 2013)

Suzuki, N.; Ishida, K. & Matsuno, T. (2013), *Fixing roller and method of manufacturing the same*, (European Union Patent Nr. EP2629154A2), <https://patents.google.com/patent/EP2629154A2/de?oq=EP2629154A2> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Swanson 1997)

Swanson, R. P. (1997), *Testing and analysis of web spreading and anti-wrinkle devices*, Proceedings of the International Conference on Web Handling [429], Fourth International Conference on Web Handling (IWEC), Stillwater, OK, USA, <https://shareok.org/handle/11244/321743> (zuletzt abgerufen am 19.03.2024).

(Szumska & Jurecki 2021)

Szumska, E. M. & Jurecki, R. S. (2021), *Parameters Influencing on Electric Vehicle Range*, Energies, 14 (16), DOI: 10.3390/en14164821.

(Tada & Yamaga et al. 2014)

Tada K.; Yamaga T. & Watanabe S. (2014), *Roll press facility*, (Japan Patent Nr. JP2014235800A), <https://patents.google.com/patent/JP2014235800A/en?oq=JP2014235800A> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Takatori 2018)

Takatori N. (2018), *Winding method and winding device of long size resin film*, (Japan Patent Nr. JP2018002386A), <https://patents.google.com/patent/JP2018002386A/en?oq=JP2018002386A> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Takekuma & Mizuguchi 2014)

Takekuma H. & Mizuguchi A. (2014), *Electrode sheet manufacturing method and manufacturing apparatus*, (Japan Patent Nr. JP2014032876A), <https://patents.google.com/patent/JP2014032876A/en?oq=JP2014032876A> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Tanaka 2006)

Tanaka, H. (2006), *Method for removing wrinkles, device for removing wrinkles, and coating method*, (United States Patent Nr. US6984412B2),

<https://patents.google.com/patent/US6984412B2/en?oq=US6984412> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Taylor & Bertoldi et al. 2014)

Taylor, M.; Bertoldi, K. & Steigmann, D. J. (2014), *Spatial resolution of wrinkle patterns in thin elastic sheets at finite strain*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 62, S. 163–180, DOI: 10.1016/j.jmps.2013.09.024.

(Üçel & Gupta et al. 2022)

Üçel, İ. B.; Gupta, P. & Gudmundson, P. (2022), *Experimental determination of the constitutive properties of a graphite anode layer in lithium-ion batteries using a bending test method*, Journal of Energy Storage, 46, DOI: 10.1016/j.est.2021.103845.

(Ueda & Hikita et al. 2010)

Ueda, H.; Hikita, S. & Hashimoto, H. (2010), *Preventing Web Defect under Transportation with Concaved Roller*, The Proceedings of the Conference on Information, Intelligence and Precision Equipment: IIP, 2010, S. 241–243, DOI: 10.1299/jsmeiip.2010.241.

(van Bommel & Divigalpitiya 2012)

van Bommel, A. & Divigalpitiya, R. (2012), *Effect of Calendering LiFePO₄ Electrodes*, Journal of The Electrochemical Society, 159 (11), S. 1791–1795, DOI: 10.1149/2.029211jes.

(VDI 2803 - Function analysis - Fundamentals and method 2019)

VDI 2803 - Function analysis - Fundamentals and method, (VDI 2803) (2019), VDI-Richtlinien, Beuth Verlag GmbH <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2803-blatt-1/296563038>.

(Vesterlund 2005)

Vesterlund, I. (2005), *Breitstreckwalze*, (Deutschland Patent Nr. DE69825899T2), <https://patents.google.com/patent/DE69825899T2/de> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Vogel & Sederholm et al. 2022)

Vogel, J. E.; Sederholm, J. G.; Shumway, E. M.; Abello, G. J.; Trask, S. E.; Wheeler, D. R. & Mazzeo, B. A. (2022), *Li-Ion Battery Electrode Contact Resistance Estimation by Mechanical Peel Test*, Journal of The Electrochemical Society, 169 (8), DOI: 10.1149/1945-7111/ac8504.

(Walker & Cole 2011)

Walker, T. J. & Cole, K. A. (2011), *Wrinkling of Foils*, International Conference on Web Handling, Stillwater, OK, USA, https://www.researchgate.net/publication/279931738_Wrinkling_of_Foils (zuletzt abgerufen am 20.02.2024).

(Wang & Wang et al. 2024)

Wang, D.; Wang, G.; Xu, C. & Liu, H. (2024), *Mechanics and deformation behavior of lithium-ion battery electrode during calendering process*, Journal of Energy Storage, 87, DOI: 10.1016/j.est.2024.111521.

(Wang & Wang et al. 2021)

Wang, H.; Wang, S.; Feng, X.; Zhang, X.; Dai, K.; Sheng, J.; Zhao, Z.; Du, Z.; Zhang, Z.; Shen, K.; Xu, C.; Wang, Q.; Sun, X.; Li, Y.; Ling, J.; Feng, J.; Wang, H. & Ouyang, M. (2021), *An experimental study on the thermal characteristics of the Cell-To-Pack system*, Energy, 227, DOI: 10.1016/j.energy.2021.120338.

(Wang 2020)

Wang S. (2020), *Wrinkle removing device for coiled film material*, (China Patent Nr. CN210914526U), <https://patents.google.com/patent/CN210914526U/en?oq=CN210914526U> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Wang & Yang et al. 2020)

Wang, T.; Yang, Y.; Fu, C.; Liu, F.; Wang, K. & Xu, F. (2020), *Wrinkling and smoothing of a soft shell*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 134, DOI: 10.1016/j.jmps.2019.103738.

(Watter 2017)

Watter, H. (2017), *Hydraulik und Pneumatik*, Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-18554-1.

(Weinmann 2022)

Weinmann, H. W. (2022), *Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe DOI: 10.5445/IR/1000151869.

(Wessel & Turetskyy et al. 2021)

Wessel, J.; Turetskyy, A.; Cerdas, F. & Herrmann, C. (2021), *Integrated Material-Energy-Quality Assessment for Lithium-ion Battery Cell Manufacturing*, Procedia CIRP, 98, S. 388–393, DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.122.

(Westermeier & Reinhart et al. 2014)

Westermeier, M.; Reinhart, G. & Steber, M. (2014), *Complexity Management for the Start-up in Lithium-ion Cell Production*, Procedia CIRP, 20, S. 13–19, DOI: 10.1016/j.procir.2014.05.026.

(Wurba & Altmann et al. 2024)

Wurba, A.-K.; Altmann, L. & Fleischer, J. (2024), *Analysis of longitudinal wrinkle formation during calendering of NMC811 cathodes under variation of different process parameters*, Production Engineering, 18, S. 497–506, DOI:

10.1007/s11740-023-01258-8.

(Wurba & Bauer et al. 2024)

Wurba, A.-K.; Bauer, V.; Seiraffi, K. & Fleischer, J. (2024), *Concepts for the Reduction of Longitudinal Wrinkles During Calendering of Battery Electrodes*, Proceedings of the 57th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2024 (CMS 2024), 130, S. 456–461, Póvoa de Varzim, Portugal, 29.05. - 31.05.2024, DOI: 10.1016/j.procir.2024.10.114.

(Wurba & Goldschmidt et al. 2024)

Wurba, A.-K.; Goldschmidt, R. & Fleischer, J. (2024), *Comparison of Longitudinal Wrinkle Formation During Calendering of NMC811 and LFP Cathodes*, Proceedings of the 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS), S. 1–8, Bamberg, Deutschland, 05.06. - 06.06.2024, DOI: 10.1109/EPTS61482.2024.10586729.

(Wurba & Klemens et al. 2023)

Wurba, A.-K.; Klemens, J.; Mayer, D.; Reusch, C.; Altmann, L.; Leonet, O.; Blázquez, J. A.; Boyano, I.; Ayerbe, E.; Scharfer, P.; Schabel, W. & Fleischer, J. (2023), *Methodology for the characterization and understanding of longitudinal wrinkling during calendering of lithium-ion and sodium-ion battery electrodes*, Proceedings of the 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP CMS '23, 120, S. 314–319, Kapstadt, Südafrika, 24.10. - 26.10.2023, DOI: 10.1016/j.procir.2023.08.056.

(Yamazaki & Yano et al. 1999)

Yamazaki Y.; Yano D.; Hotsuta T. & Matsumoto M. (1999), *Coating application method*, (Japan Patent Nr. JPH11128822A), <https://patents.google.com/patent/JPH11128822A/en?oq=JPH11128822A> (zuletzt abgerufen am 19.03.2024).

(Yan & Zhang et al. 2014)

Yan, D.; Zhang, K.; Peng, F. & Hu, G. (2014), *Tailoring the wrinkle pattern of a microstructured membrane*, Applied Physics Letters, 105 (7), DOI: 10.1063/1.4893596.

(Yurcu & Beisel et al. 2012)

Yurcu, H. H.; Beisel, J. A. & Good, J. K. (2012), *The effect of roller taper on webs*, TAPPI Journal, 11 (11), S. 31–38,.

(Zhang 2019)

Zhang S. (2019), *Cloth wrinkle removing equipment for spinning*, (China Patent Nr. CN106868762B), <https://patents.google.com/patent/CN106868762B/en?oq=CN106868762B> (zuletzt abgerufen am 24.02.2024).

(Zhao & Hu et al. 2020)

Zhao, L.; Hu, Z.; Lai, W.; Tao, Y.; Peng, J.; Miao, Z.; Wang, Y.; Chou, S.; Liu, H.

& Dou, S. (2020), *Hard Carbon Anodes: Fundamental Understanding and Commercial Perspectives for Na-Ion Batteries beyond Li-Ion and K-Ion Counterparts*, Advanced Energy Materials, 11 (1), DOI: 10.1002/aenm.202002704.

(Zheng & Tan et al. 2012)

Zheng, H.; Tan, L.; Liu, G.; Song, X. & Battaglia, V. S. (2012), *Calendering effects on the physical and electrochemical properties of Li[Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}]O₂ cathode*, Journal of Power Sources, 208, S. 52–57, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.001.

(Zheng 2009)

Zheng, L. (2009), *Wrinkling of Dielectric Elastomer Membranes*, Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA DOI: 10.7907/RTAB-GX13.

(Zhu & Gastol et al. 2021)

Zhu, P.; Gastol, D.; Marshall, J.; Sommerville, R.; Goodship, V. & Kendrick, E. (2021), *A review of current collectors for lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources, 485, S. 229321, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.229321.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Batteriezelltypen im Überblick: a) Rundzelle, b) Pouch-Zelle, c) prismatische Zelle in Anlehnung an (Korthauer & Pettinger 2013, S. 112)	5
Abbildung 2-2 Schematische Darstellung der Oberseite einer spiegelsymmetrischen Beschichtung	5
Abbildung 2-3 Aufbau und Funktionsweise einer LIB im Entladenvorgang in Anlehnung an (Börger & Wenzl 2023, S. 290; Korthauer & Pettinger 2013, S. 15)	6
Abbildung 2-4 Eigenschaften der Komponenten des NMC und Entwicklung der Zusammensetzung nach (Börger & Wenzl 2023, S. 296)	10
Abbildung 2-5 Einordnung der Prozessschritte der Elektrodenfertigung in die Prozesskette der Batteriezellfertigung in Anlehnung an (Korthauer & Pettinger 2013, S. 116)	13
Abbildung 2-6 Einordnung der Prozessschritte der Assemblierung in die Prozesskette der Batteriezellfertigung in Anlehnung an (Kampker 2014, S. 20)	15
Abbildung 2-7 Dreiwalzen-Kalander in der Kautschukverarbeitung in Anlehnung an (Röthemeyer 2013, S. 634) und Walzgerüste in der Blechverarbeitung in Anlehnung an (Arendes 2023, S. 40)	17
Abbildung 2-8 Geometrische und kinematische Verhältnisse im Walzspalt nach der elementaren Walztheorie in Anlehnung an (Fritz & Schmütz 2022, S. 159–162; Lange 1988, S. 181–189)	19
Abbildung 2-9 Schematische Darstellung der Beschichtung vor und nach dem Kalandrieren in Anlehnung an (Meyer & Kosfeld et al. 2018, S. 374)	24
Abbildung 2-10 Versagensmechanismen in Anlehnung an (Haselrieder & Westphal et al. 2015, S. 3; Luo & Zhu et al. 2018, S. 3997)	30
Abbildung 2-11 Übersicht über die durch das Kalandrieren hervorgerufenen Elektrodedefekte: a) Verformung, b) Welligkeit, c) Camber, d) Delamination, e) Folienverprägung, f) Längsfalte, e) Bahnriß	34
Abbildung 2-12 a) Abweichungen von einem parallelen Walzspalt nach (Rammerstorfer 2018, S. 891), b) Gegenbiegung nach (Röthemeyer 2013, S. 623)	36

Abbildung 2-13 Beulen und Faltenbildung in Abhängigkeit der Spannung, erweitert nach (Jacques & Elias et al. 2007, S. 34)	39
Abbildung 2-14 Mohr'scher Spannungskreis für die Beul-, Knick- und Faltenbildung in Bahnen nach (Roisum 1996, S. 218–219): a) Normalzustand, b) Bildung von Beulen, Knicken und Falten	40
Abbildung 2-15 Beispiel einer Breitstreckwalze mit gebogener Achse, entnommen aus (Honold & Erkelenz 2015, S. 1)	44
Abbildung 2-16 Funktionsweise einer Breitstreckwalze mit gebogener Achse nach (Damour 2002, S. 73)	44
Abbildung 2-17 Breitstreckwalze mit gerader Achse und spiralförmigem, gewickeltem Profil, entnommen aus (Schmoock, 1990, S. 7)	45
Abbildung 2-18 a) Breitstreckwalze mit gerader Achse und expandierender Oberfläche, b) Draufsicht mit eingespannter Bahn nach (Damour 2002, S. 74)	46
Abbildung 2-19 a) Verschiedene konvexe Walzen, entnommen aus (Ishida & Tada 2012, S. 9) b) Einsatz von konvexen Walzen vor dem Aufwickeln von kalandrierten Elektroden, entnommen aus (Takatori 2018, S. 9)	47
Abbildung 2-20 Führungsrollen zum Ausgleich der Geschwindigkeitsunterschiede beim Einsatz von konvexen Rollen, entnommen aus (Tanaka 2006, S. 2)	48
Abbildung 2-21 Gebogene Walze mit konischen Walzelementen, entnommen aus (Genthe 2012, S. 4)	48
Abbildung 2-22 Umlenkrolle, die lediglich die Beschichtung berührt, entnommen aus (Fujita 2014, S. 1)	49
Abbildung 2-23 Bandsystem zur Streckung der Bahn (Matsutani 2001, S. 5)	49
Abbildung 2-24 Stabilisierung einer welligen Bahn, entnommen aus (Eizo & Yutaka et al. 2000, S. 3)	50
Abbildung 2-25 Kantenstrecksystem der Firma Converter Accessory Corporation (Converter Accessory Corporation o. J., S. 6)	50
Abbildung 2-26 Vorrichtung zur Minimierung der Folienverprägung (Barthel & Bold et al. 2022, S. 13)	51

Abbildung 2-27 An die Kalanderwalze angepresste Walzen (Katsuhiko & Shigeru 2016, S. 12)	52
Abbildung 4-1 Überblick über die wesentlichen Einflussfaktoren	57
Abbildung 4-2 Schematische Darstellung des GKL 500 MS mit eingespannter Elektrode nach (SAUERESSIG GmbH + Co. KG 2013, S. 54) und Positionen zur Messdatenerfassung	58
Abbildung 4-3 REM-Aufnahmen der LIB-Kathoden bei 1500-facher Vergrößerung (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3)	61
Abbildung 4-4 Exemplarische REM-Aufnahmen der HC-Anoden bei 1500-facher Vergrößerung	63
Abbildung 4-5 Bildung einer Längsfalte a) Foto b) 3D-Scan mit farblich gekennzeichneter Profilhöhe (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 316)	64
Abbildung 4-6 Profil einer Längsfalte mit den relevanten Bezugspunkten, entnommen aus einem Laserdatensatz nach (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 316)	65
Abbildung 4-7 Definition der approximierten Fläche der Längsfalte <i>ALF</i> , <i>approx.</i> 66	66
Abbildung 4-8 Überblick über die Untersuchung des Zielsystems	66
Abbildung 4-9 a) Laser und 3D-Scanner in ihrer Aufnahmeposition, b) Laserstrahl auf der Elektrode, c) Messfeld des 3D-Scanners auf der Elektrode mit Referenzpunkten	67
Abbildung 4-10 a) Elektrode mit Referenzzyylinder und Auswertebereich, b) Profilschnitt im Auswertebereich	69
Abbildung 4-11 Ablauf des MATLAB-Programms zur Berechnung der Längsfaltengeometrie, (SB = Suchbereich) nach (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317)	69
Abbildung 4-12 a) Profil aus einem Laserdatensatz mit Reflexionen (rote Pfeile), b) zweite Ableitung eines Profils aus einem Laserdatensatz mit Reflexionen c) zweite Ableitung eines fehlerfreien Datensatzes nach (A_Reusch 2023, S. 49,51)	70
Abbildung 4-13 a) Datensatz mit Reflexionen, b) gefilterter Datensatz nach (A_Reusch 2023, S. 53)	71

Abbildung 4-14 2D-Ansicht des Laserdatensatzes, Definition der a) Beschichtungskante, b) Spitze der Längsfalte, c) Begrenzungslinien nach (A_Reusch 2023, S. 56, 61, 69)	72
Abbildung 4-15 Ergebnis der Verarbeitung eines Laserdatensatzes nach (A_Reusch 2023, S. 69; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 317)	73
Abbildung 4-16 Vergleich der Geometriewerte für die Messungen mit dem Laser und dem 3D-Scanner nach (Wurba & Klemens et al. 2023, S. 318)	74
Abbildung 4-17 a) Messfeld auf der besprühten Elektrode, b) ATOS Core 135 bei der Aufnahme des Punktemusters vor dem Kalandrieren	75
Abbildung 4-18 Exemplarische Darstellung der Dehnungen auf der Elektrodenoberfläche in der Software GOM Correlate a) x-Dehnung ε_x b) y-Dehnung ε_y	76
Abbildung 4-19 Definition der Amplitude und Wellenlänge anhand eines Profils in y-Richtung in Anlehnung an (A_Seiraffi 2024, S. 41)	77
Abbildung 4-20 Datensatz in der Draufsicht a) Reflexionen vor der Auswahl, b) beschichteter Bereich nach der Auswahl nach (A_Seiraffi 2024, S. 45,47)	77
Abbildung 4-21 Auswahl des auszuwertenden Bereichs in der Frontansicht: a) mit Reflexionen vor der Auswahl, b) nach der Auswahl	78
Abbildung 4-22 Definition der Schnitte in Laufrichtung nach (A_Seiraffi 2024, S. 47)	78
Abbildung 4-23 Exemplarische Profile geglättet (blau), unverarbeitet (rot), mit gefundenen Maxima und Minima nach (A_Seiraffi 2024, S. 48)	79
Abbildung 4-24 Erkannte Minima und Maxima ohne Erwartungswerte in Anlehnung an (A_Seiraffi 2024, S. 51)	79
Abbildung 4-25 Vergleich der Messverfahren: a) MATLAB Auswertung, b) manuelle Auswertung in der Software LJX-Observer nach (A_Seiraffi 2024, S. 54)	80
Abbildung 4-26 a) 3D-Ansicht einer ausgebeulten Elektrode, b) Lage der Schnitte	81
Abbildung 4-27 Schematischer Aufbau der Zweipunktbiegeprüfung an Elektroden in Anlehnung an (A_Altermann 2022, S. 44; Klemens & Wurba et al. 2023, S. 12)	82
Abbildung 4-28 Schematische Darstellung des 90°-Schälversuchs	83

Abbildung 4-29 Schematischer Aufbau des Reibversuchs in Anlehnung an (DIN EN ISO 8295 2004)	85
Abbildung 4-30 Flächenzentrierter Versuchsplan nach (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 42)	87
Abbildung 4-31 Beschichtungsfehler in HC_25_15_155: a) unkalandriert mit klebender Schicht, b) kalandrierte Beschichtungsfehler	90
Abbildung 4-32 Beschichtungsdicken dB nach dem Kalandrieren, Linienlasten qL und Verdichtung Π in Abhängigkeit der Dichte	91
Abbildung 5-1 Vergleich der Mittelwerte der Dehnungen für LFP_50 und NMC_50	93
Abbildung 5-2 HE-Diagramm für die x-Dehnung ε_x für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 4)	93
Abbildung 5-3 HE-Diagramm für die y-Dehnung ε_y für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 4)	94
Abbildung 5-4 Vergleich der Mittelwerte der a) Amplitude a und b) Wellenlänge λ für LFP_50 und NMC_50	96
Abbildung 5-5 HE-Diagramm für die Amplitude a für LFP_50 und NMC_50	97
Abbildung 5-6 HE-Diagramm für die Wellenlänge λ für LFP_50 und NMC_50	97
Abbildung 5-7 Vergleich der breitenbezogenen Biegesteifigkeit S für die Mittelwerte aus allen unkalandrierten und kalandrierten Elektroden für LFP_50 und NMC_50	99
Abbildung 5-8 HE-Diagramm für die breitenbezogene Biegesteifigkeit S für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 4)	100
Abbildung 5-9 Vergleich der breitenbezogenen Haftkraft FH für die Mittelwerte aus allen unkalandrierten und kalandrierten Elektroden für LFP_50 und NMC_50	102
Abbildung 5-10 HE-Diagramm für die breitenbezogene Haftkraft FH für LFP_50 und NMC_50	102
Abbildung 5-11 Folienoberfläche nach dem Abziehen der Beschichtung: a) NMC_50 unkal., b) NMC_50 max. kal., c) LFP_50 unkal., d) LFP_50 max. kal.	104
Abbildung 5-12 Reibungskoeffizienten für die angegebenen Materialien in Kontakt mit eloxiertem Al	105

Abbildung 5-13 Übersicht über die signifikanten Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den Materialeigenschaften	106
Abbildung 5-14 a) Schematische Darstellung der Längsfaltenbildung mit der Anpresskraft FFP und der Streckkraft $Fstr$ (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 500; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 2) b) ankommende deformierte Elektrode	107
Abbildung 5-15 HE-Diagramm für die Längsfaltenhöhe hL für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)	108
Abbildung 5-16 HE-Diagramm für die Längsfaltenbreite bL für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 6)	110
Abbildung 5-17 3D-Scan der Elektrode beim Auftreffen auf die Umlenkrolle (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 502)	110
Abbildung 5-18 HE-Diagramm für die Distanz dL für LFP_50 und NMC_50 (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 6)	112
Abbildung 5-19 Übersicht über die signifikanten Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Längsfaltengeometrie	113
Abbildung 5-20 Übersicht über die signifikanten Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Längsfaltengeometrie	117
Abbildung 5-21 HE-Diagramm für die Längsfaltenhöhe für NMC_30 und NMC_50119	
Abbildung 5-22 HE-Diagramm für die Längsfaltenbreite für NMC_30 und NMC_50	120
Abbildung 5-23 HE-Diagramm für die Längsfaltenbreite für NMC_30 und NMC_50	121
Abbildung 6-1 Vergleich der a) x-Dehnungen ε_x und b) y-Dehnungen ε_y zwischen LFP_50 und den Variationen des HC	126
Abbildung 6-2 Vergleich der maximalen Auslenkung bei den HC-Anoden in Abhängigkeit der Dichte	127
Abbildung 6-3 Vergleich der breitenbezogenen Biegesteifigkeit S zwischen LFP_50 und den Variationen des HC: a) Unterschied zwischen unkalandriert und kalandriert (Mittelwerte), b) Vergleich nach Dichten	128

Abbildung 6-4 Vergleich der breitenbezogenen Haftkraft FH zwischen LFP_50 und den Variationen des HC: a) Unterschied zwischen unkalandriert und kalandriert (Mittelwerte), b) Vergleich nach Dichten	129
Abbildung 6-5 a) Exemplarische lichtmikroskopische Aufnahme bei 2,5-facher Vergrößerung, b) Anteil der schwarzen Pixel	130
Abbildung 6-6 Überblick über die Übertragbarkeit der Materialeigenschaften der NMC_50- (grau) und LFP_50-Kathoden (grün) auf die Materialeigenschaften der HC-Anoden (schwarz)	132
Abbildung 6-7 Vergleich der Höhe der Längsfalten zwischen allen Elektroden	132
Abbildung 6-8 Vergleich der Breite der Längsfalte zwischen allen Elektroden	134
Abbildung 6-9 Vergleich der Distanz der Längsfalte zur Beschichtungskante zwischen allen Elektroden	135
Abbildung 6-10 Approximierte Faltenfläche $AL, approx.$	135
Abbildung 6-11 Einfluss der breitenbezogenen Biegesteifigkeit S auf die Geometrie der Längsfalte	136
Abbildung 7-1 FAST-Diagramm basierend auf (A_Bauer 2023, S. 36; Naefe 2018, S. 95–97; VDI 2803 - Function analysis - Fundamentals and method 2019, S. 16)	141
Abbildung 7-2 Verschiedene Möglichkeiten der kontinuierlichen Kraftübertragung mithilfe von Rollen: a) formschlüssig durch Andruckkraft der Rolle, b) kraftschlüssig durch Reibung mit Anstellwinkel, c) kraftschlüssig durch Antriebsmoment nach (A_Bauer 2023, S. 38; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)	142
Abbildung 7-3 Prinzipskizzen des Rollenkonzepts nach (A_Bauer 2023, S. 43)	144
Abbildung 7-4 a) Rollenhalter nach (A_Bauer 2023, S. 50) b) verschiedene Rollengeometrien nach (A_Bauer 2023, S. 49; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)	144
Abbildung 7-5 CAD-Modell des gesamten Rollenkonzepts nach (A_Bauer 2023, S. 52; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)	145
Abbildung 7-6 Prinzipskizzen des Fingergreiferkonzepts nach (A_Bauer 2023, S. 45)	146
Abbildung 7-7 CAD-Modell des gesamten Fingergreiferkonzepts (A_Bauer 2023, S. 73; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)	147

Abbildung 7-8 Skizze des Fingergreifers nach (A_Bauer 2023, S. 61; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)	148
Abbildung 7-9 Detaillierter Bewegungsablauf des Fingergreifers nach (A_Bauer 2023, S. 55; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)	148
Abbildung 7-10 Antriebsstrang des Fingergreifers nach (A_Bauer 2023, S. 58)	149
Abbildung 7-11 Exemplarischer Schnitt in x-Richtung durch die Laserdaten einer kalandrierten NMC_30-Kathode mit und ohne zusätzliche Rollen (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)	151
Abbildung 7-12 Längsfaltenfreie Elektroden: a) konische Rollen, b) spiralförmig profilierte Rollen (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5)	152
Abbildung 7-13 Fotografien (oben) (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5) und lichtmikroskopische Aufnahmen bei 10-facher Vergrößerung (unten) der Materialien der Kontaktflächen: a) glatter Filz, b) rauer Filz, c) strukturierter Gummi, d) glatter Gummi	153
Abbildung 7-14 a) Dynamische und statische Reibungskoeffizienten (μ_d und μ_s) für den glatten (GF) und rauen Filz (RF) sowie für den strukturierten (SG) und glatten Gummi (GG), b) konstruktive Umsetzung der Erhöhung der Kontaktfläche (A_Seiraffi 2024, S. 96, 57)	155
Abbildung 7-15 Längsfaltenbildung (rote Pfeile) mit Einsatz der Fingergreifer und den Kontaktflächen a) glatter Filz, b) rauer Filz	155
Abbildung 7-16 Auswertung der Längsfaltenhöhe mithilfe der Software LJ-X Observer: a) Draufsicht mit eingezeichneten Schnittlinien b) gemittelte Profilansicht mit Angabe des Höhenwertes in Anlehnung an (A_Seiraffi 2024, S. 61)	156
Abbildung 7-17 Änderung der Höhe der Längsfalte über die verschiedenen Versuchsparameter und Referenz ohne Eingreifen der Fingergreifer (6_NMC_30) nach (A_Seiraffi 2024, S. 100; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5)	157
Abbildung 0-1 Einfluss der x-Dehnung ε_x auf die Geometrie der Längsfalte bei HC	XIII
Abbildung 0-2 Einfluss der y-Dehnung ε_y auf die Geometrie der Längsfalte bei HC	XIII

Abbildung 0-3 Einfluss der maximalen Höhendifferenz ΔZ_{Max} (maximale Auslenkung)
auf die Geometrie der Längsfalte bei HC XIV

Abbildung 0-4 Einfluss der breitenbezogenen Haftkraft FH auf die Geometrie der
Längsfalte XIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Eigenschaften von ausgewählten Kathodenmaterialien entnommen aus (Börger & Wenzl 2023, S. 296)	10
Tabelle 2-2 Typische Dichten vor und nach dem Kalandrieren sowie zugehörige Linienlasten nach (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293)	23
Tabelle 4-1 Liste der relevantesten Größen der Einflussfaktoren, grau: unveränderlich, grün: einstellbar, gelb: abhängig	57
Tabelle 4-2 Relevante einstellbare Prozessparameter beim Kalandrieren, entnommen aus der Betriebsanleitung (SAUERESSIG GmbH + Co. KG 2013, S. 15–16) und ergänzt um eigene Erfahrungswerte	59
Tabelle 4-3 Übersicht über die sich unterscheidenden Parameter der verwendeten LIB-Kathoden im unkalandrierten Zustand, entnommen aus (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 2; Wurba & Klemens et al. 2023, S. 315)	60
Tabelle 4-4 Übersicht über die sich unterscheidenden Parameter der verwendeten NIB-Anoden im unkalandrierten Zustand	62
Tabelle 4-5 Überblick über die tatsächlichen Abmessungen der HC-Anoden und Anteil der Ableiterbreite an der Gesamtelektrodenbreite	62
Tabelle 4-6 Vergleich der Wellenlängen und Amplituden für die beiden Messverfahren in Anlehnung an (A_Seiraffi 2024, S. 78)	80
Tabelle 4-7 Flächenzentrierter Versuchsplan für NMC_50 und LFP_50 (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 498)	86
Tabelle 4-8 Codierte Faktorstufen für NMC_50 und LFP_50	87
Tabelle 4-9 Vollfaktorieller Versuchsplan für NMC_30 nach (Wurba & Altmann et al. 2024, S. 499)	87
Tabelle 4-10 Versuchsplan für die HC-Anoden	89
Tabelle 5-1 p -Werte signifikanter HE, WW und QE für die x- und y-Dehnung (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3)	94
Tabelle 5-2 p -Werte signifikanter HE für die Amplitude α und Wellenlänge λ	98
Tabelle 5-3 p -Werte signifikanter HE für die breitenbezogene Biegesteifigkeit S (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 3)	101

Tabelle 5-4 <i>p</i> -Werte signifikanter HE und WW für die breitenbezogene Haftkraft <i>FH</i>	103
Tabelle 5-5 <i>p</i> -Werte signifikanter HE für die Längsfaltenhöhe <i>hL</i>	109
Tabelle 5-6 <i>p</i> -Werte signifikanter HE für die Längsfaltenbreite <i>bL</i> (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)	109
Tabelle 5-7 <i>p</i> -Werte signifikanter HE für die Distanz <i>dL</i> (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)	112
Tabelle 5-8 Pearson-Korrelationskoeffizienten <i>r</i> für die Beziehung zwischen x- und y-Dehnung und der Geometrie der Längsfalte, links NMC_50 in grau und rechts LFP_50 in grün, fett markierte Werte sind signifikant (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 7)	115
Tabelle 5-9 Pearson-Korrelationskoeffizienten <i>r</i> für die Beziehung zwischen der Amplitude und Wellenlänge und der Geometrie der Längsfalte, links NMC_50 in grau und rechts LFP_50 in grün, fett markierte Werte sind signifikant	115
Tabelle 5-10 Pearson-Korrelationskoeffizienten <i>r</i> für die Beziehung zwischen der breitenbezogenen Biegesteifigkeit und der Geometrie der Längsfalte, links NMC_50 in grau und rechts LFP_50 in grün, fett markierte Werte sind signifikant (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 7)	116
Tabelle 5-11 Pearson-Korrelationskoeffizienten <i>r</i> für die Beziehung zwischen der breitenbezogenen Haftkraft und der Geometrie der Längsfalte, links NMC_50 in grau und rechts LFP_50 in grün, fett markierte Werte sind signifikant	117
Tabelle 5-12 Verhältnis aus der Höhe der Längsfalte <i>hLbSub</i> bei der angegebenen unbeschichteten Substratbreite <i>bSub</i> und der angegebenen Substratbreite selbst (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)	119
Tabelle 5-13 Verhältnis aus der Distanz <i>dLbSub</i> bei der angegebenen unbeschichteten Substratbreite <i>bSub</i> und der angegebenen Substratbreite selbst (Wurba & Goldschmidt et al. 2024, S. 5)	122
Tabelle 6-1 Überblick über den Einfluss der Dichtesteigerung auf die Längsfaltengeometrie codiert als +1 (> 15 %), 0 und -1 (< -15 %) und Übereinstimmung mit LIB, sofern vorhanden	137

Tabelle 6-2 Überblick über den Einfluss der Anodeneigenschaften im Vergleich zur Referenz (HC_25_15_155) auf die Längsfaltengeometrie codiert als +1 (> 15 %), 0 und -1 (< 15 %)	138
Tabelle 7-1 Morphologischer Kasten für die potenziellen Teillösungen mit dem Rollenkonzept in dunkelgrau und dem Fingergreiferkonzept in hellgrau nach (A_Bauer 2023, S. 41,45; Wurba & Bauer et al. 2024, S. 3)	143
Tabelle 7-2 Funktionsfähigkeit der Rollentypen in Abhängigkeit des Anstellwinkels ϑ (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 4)	150
Tabelle 7-3 Versuchsplan zur Validierung der Funktionsfähigkeit der Fingergreiferkonzepte (Wurba & Bauer et al. 2024, S. 5)	153

Anhang

Die folgenden Abbildungen ergänzen die Betrachtung der Korrelation zwischen den Materialgrößen und den Geometriewerten der Längsfalten für die HC-Anoden. Sie beziehen sich auf Kapitel 6.2.4.

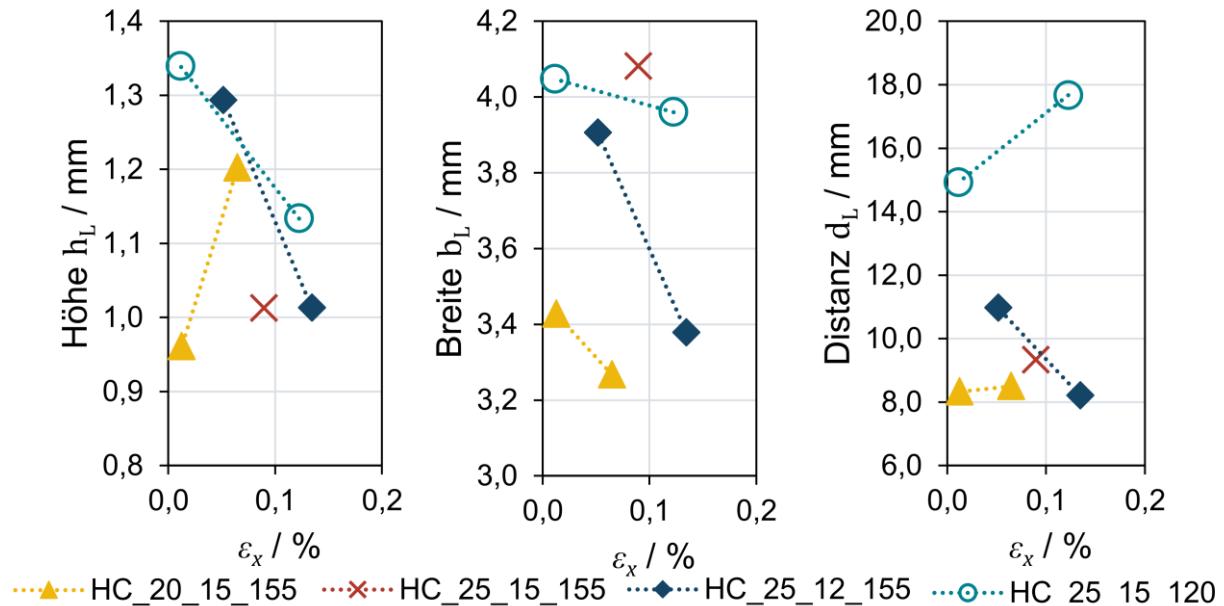


Abbildung 0-1 Einfluss der x-Dehnung ε_x auf die Geometrie der Längsfalte bei HC

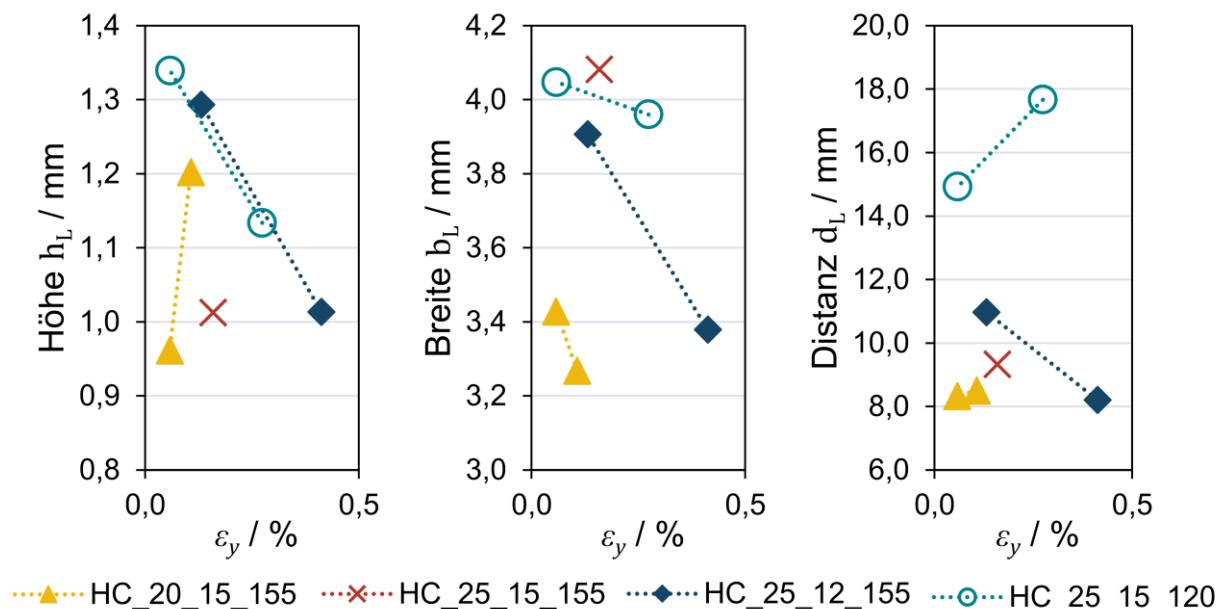


Abbildung 0-2 Einfluss der y-Dehnung ε_y auf die Geometrie der Längsfalte bei HC

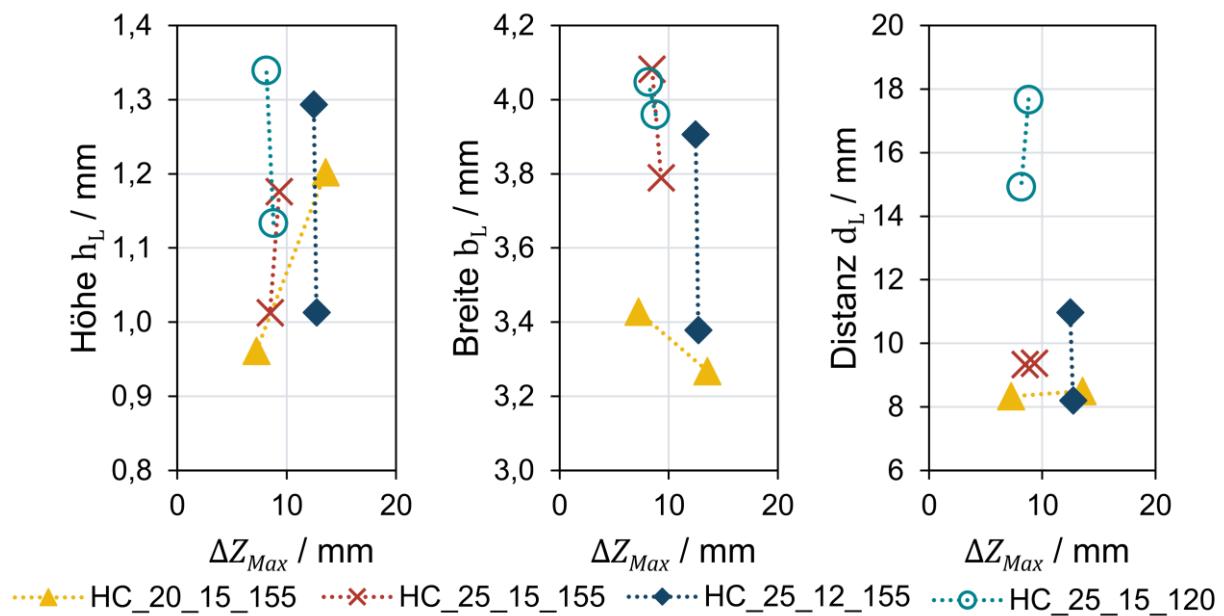


Abbildung 0-3 Einfluss der maximalen Höhendifferenz ΔZ_{Max} (maximale Auslenkung) auf die Geometrie der Längsfalte bei HC

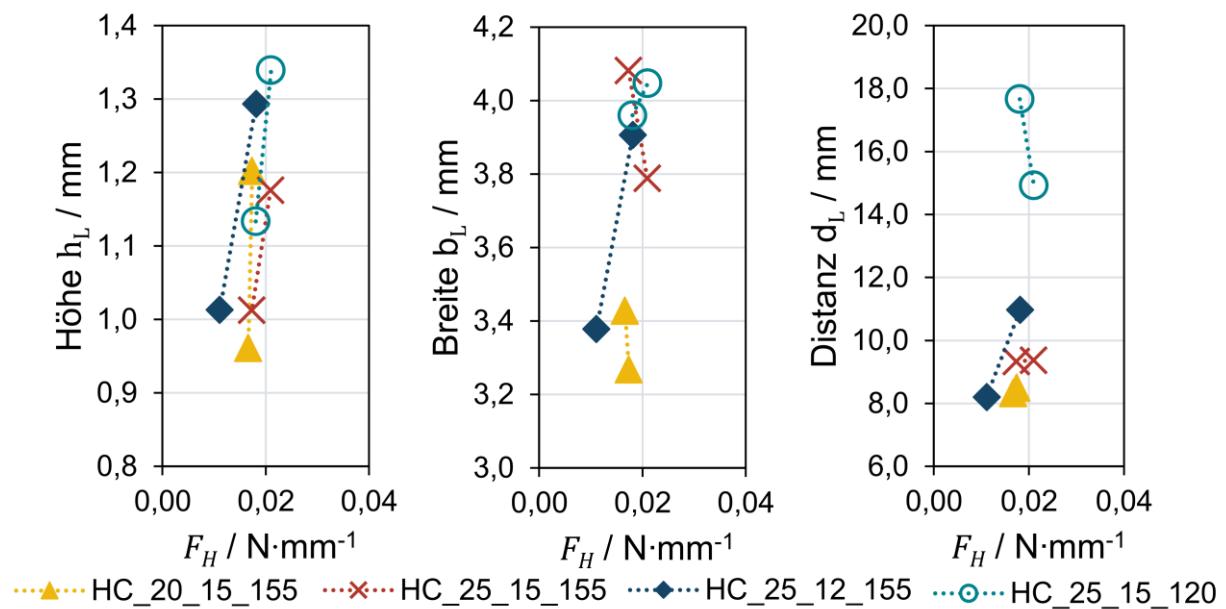


Abbildung 0-4 Einfluss der breitenbezogenen Haftkraft F_H auf die Geometrie der Längsfalte

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten
Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbstdiagnosztische Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktions-systeme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkabaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiebold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünfachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

**Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine
mitarbeiterorientierte Informationsversorgung**

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

**Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen
elektrohydraulischen Linearantriebs**

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

**Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von
industriell eingesetzten Kleingeräten**

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

**Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein
Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-
Systeme im Anlagenbau**

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

**Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer
Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb**

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

**Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen:
Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von
Interaktionen von Bearbeitungsobjekten**

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

**Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten
Fertigungsstrukturen**

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hüksam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönnheimer

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermisch bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskraftrichtungsangepasste Frästrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und

Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des

Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für µMIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-effizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobile Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes
for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel
einer Einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten
Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in
globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen
Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch
modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngroßen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicher-
heit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz

Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken

Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning

Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken
Strategie- und Komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und

Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von

Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an

Kugelgewindetriebsspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels
Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur

Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

**Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von
Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen**

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

**Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic
Emission**

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

**Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende
Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile**

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönnheimer

**Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-
Produktionssystemen**

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

**Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in
der MRK**

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Band 289

Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

Prozessgeregelte Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren

Band 290

Dr.-Ing. Patrizia Konstanze Gartner

Konzept eines Selbstheilungsmechanismus für Polymerelektrolytmembranen

Optimierung der Lebensdauer und der Effizienz von Brennstoffzellen

Band 291

Dr.-Ing. Jens Schäfer

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

Band 292

Dr.-Ing. Gwen Louis Steier

Strategischer Fit in globalen Produktionsnetzwerken

Entscheidungsunterstützung für die strategische Netzwerkkonfiguration

Band 293

Dr.-Ing. Louis Schäfer

Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung:

Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 294

Dr.-Ing. Jan-Philipp Kaiser

Autonomous View Planning using Reinforcement Learning

Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Band 295

Dr.-Ing. Wilken Wößner

Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 296

Dr.-Ing. Ann-Kathrin Wurba

**Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von
Batterieelektroden**

