

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

Benjamin Bold

**Kompensation der Wrinkle-Bildung beim
Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden**
Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur
Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 273

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

Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur
Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 273

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur
Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

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

DISSERTATION

von

Benjamin Bold, M.Sc.
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 11.10.2023

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdger Daub

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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9311-7

ISSN 0724-4967

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 ist 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 als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung 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 des Verfassers

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entstanden.

Für die Übernahme des Hauptreferats möchte ich mich ganz besonders bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer bedanken. Seine wertvollen Gespräche, das Vertrauen, das er in meine Fähigkeiten gesetzt hat, sowie die Freiheit, die er mir gewährte, um tiefgehendes Fachwissen zu erlangen und meine persönliche Weiterentwicklung voranzutreiben, sind für mich von unschätzbarem Wert. Für die Übernahme des Koreferats möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub bedanken, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer.

Wertvoll und unabdingbar war die gemeinsame Zeit mit allen Kolleginnen und Kollegen des wbk und des Batterietechnikums. Für die gute Zusammenarbeit, den fachlichen Austausch und die gegenseitige Unterstützung gilt mein großer Dank. Ebenso bin ich den Studierenden sehr dankbar, die meine Forschungsarbeiten unterstützt haben. Einige von ihnen haben über Jahre hinweg als wissenschaftliche Hilfskräfte oder im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten einen bedeutenden Beitrag geleistet.

Mein größter Dank gebührt meiner Familie: Meine Eltern Gabrielle und Richard Bold haben mich stets unterstützt und mir den notwendigen Rückhalt gegeben, sodass ich tatkräftig mit Freude die erforderliche Leistung erbringen konnte, ohne dabei die zwischenmenschlichen Werte aus den Augen zu verlieren. Bei meiner Schwester Beatrix bedanke ich mich für ihre Unterstützung und die Vorbildfunktion mit einer bereits abgeschlossenen Promotion. Diese Arbeit widme ich meiner Oma Magdalena und Astrid Tari Fundis, die mir den Mut zu neuen und unbekanntenen Schritten und die notwendige Zuversicht gaben.

Karlsruhe, Oktober 2023

Benjamin Bold

Kurzfassung

Die voranschreitende Elektrifizierung der unterschiedlichsten Branchen verlangt nach einer optimierten Produktion der dazu notwendigen Energiespeicher, den Batterien. Besonders wichtig ist es, die Eigenschaft Energiedichte von Batteriezellen zu erhöhen. Ein entscheidender Prozessschritt ist dafür das Kalandrieren von Batterieelektroden zur Steigerung der Energiedichte. Insbesondere die Herstellung von Kathodenelektroden für Lithium-Ionen-Batteriezellen stellen für den Produktionsprozess für eine hohe Energiedichte und damit einhergehend einer starken Verdichtung eine Herausforderung dar.

Dabei tritt ein prägnanter Elektrodendefekt auf, die sogenannten „Wrinkles“. Hierbei handelt es sich um Falten auf der Elektrode am Übergang von der Beschichtung hin zum unbeschichteten Randbereich. Das Augenmerk dieser Arbeit liegt darin, den Elektrodendefekt aufzunehmen, mit Parametern zu beschreiben, zu bewerten und in Zusammenhang zu Prozessparametern zu bringen. Statistische Versuchspläne lassen allgemeingültige Aussagen zu den Wirkzusammenhängen zu, sodass eine Modellbildung möglich ist. Der Erkenntnisgewinn der Wechselwirkungen zwischen Material, Elektrodendefekt und Prozessparametern ermöglicht die detaillierte Ursachenfindung des Elektrodendefekts und damit die Ableitung einer materialunabhängigen prozesstechnischen Gegenmaßnahme.

Zur Detektion der Elektrodendefekte wird der Kalandrierer um Inline-Qualitätssicherungen ergänzt. Es handelt sich dabei zum einen um ein Markierungssystem, das ein Muster auf die Elektrode im unkalandrierten Zustand aufbringt. Die Veränderung des Musters durch das Kalandrieren lässt eine Beurteilung der eingebrachten Dehnung im Dreidimensionalen zu. Zum anderen wird inline ein Linienlaser verwendet, um die entstehenden Falten, die sogenannten „Wrinkles“, geometrisch zu vermessen.

Das Ergebnis der Arbeit ist die Umsetzung eines Zusatzprozesses am Kalandrierer, der sich an jeder Kalandrieranlage materialunabhängig einsetzen lässt. Die durch das Kalandrieren eingebrachte Dehnung in den beschichteten Bereich wird in den unbeschichteten Randbereich übertragen. Das in der Arbeit erarbeitete Anti-Wrinkle-Modul am Kalandrierer sieht folglich die Einbringung dieser Streckung in den Randbereich vor. Dadurch weist die Elektrode nach dem Kalandrieren einen homogenen Materialzustand auf.

Abstract

The increasing electrification of a wide range of industries requires optimized production of the necessary energy storage devices, the batteries. It is particularly important to increase the energy density of battery cells. A key process step is the calendaring of battery electrodes to increase the energy density. In particular, the production of cathode electrodes for lithium-ion battery cells is a challenge for the production process for high energy density and the related high degree of compression.

In this process, a prominent electrode defect occurs, the so-called "wrinkles". These are folds on the electrode at the boundary between the coating and the uncoated edge area. The focus of this work is to detect the electrode defect, to describe it with parameters, to evaluate it and to relate it to process parameters. Statistical experiment designs allow generally valid statements to be made about the interactions, so that model building is possible. The knowledge gained of the interactions between material, electrode defect and process parameters enables the detailed determination of the cause of the electrode defect and thus the development of a material-independent process-engineering countermeasure.

To detect the electrode defects, the calender is upgraded with inline quality assurance systems. One of these is a marking system that applies a pattern to the electrode in the uncalendered state. The change in the pattern due to calendaring allows an evaluation of the introduced strain in three dimensions. Secondly, a line laser is used in line to geometrically measure the resulting wrinkles.

The result of the work is the implementation of an additional process on the calender that can be used on any calendaring line, regardless of the material. The strain introduced into the coated area by calendaring is transferred to the uncoated edge area. The anti-wrinkle module on the calender created in the work consequently provides for the introduction of a stretch in the uncoated edge area. As a result, the electrode shows a homogeneous material state after calendaring.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	III
Formelzeichen	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen der Funktionsweise und Herstellung einer Batteriezelle	7
2.1 Aufbau und Funktionsweise einer Batteriezelle	7
2.2 Batteriezellproduktion	15
2.3 Kalandrieren	25
2.3.1 Verbesserungen der elektrochemischen Eigenschaften	25
2.3.2 Veränderungen der mechanischen Eigenschaften	28
3 Stand der Forschung und Technik des Kalandrierens	35
3.1 Beschreibung von Walzvorgängen	35
3.2 Stand der Technik des Kalandrierens von Batterieelektroden	38
3.3 Elektrodendefekte und deren qualitative Ursachen	42
3.4 Wirkzusammenhänge zwischen benachbarten Prozessschritten	49
3.5 Bewertung des Stands der Technik und Forschungshypothese	56
4 Zielsetzung und Vorgehensweise	58
5 Prozessverständnis der Wrinkle-Bildung	60
5.1 Experimentelle Vorgehensweise zur Beschreibung der Wrinkle-Bildung	60
5.2 Verzerrungsdetektion	76
5.3 Wrinkle-Detektion	91
5.4 Versuchsplanung am Standardkalandrierprozess	100
6 Modellbildung	105

6.1	Ergebnisse der Versuchsreihen	105
6.2	Modellbildung des Kalandrierprozesses nach aktuellem Stand der Technik	116
7	Anti-Wrinkle-Modul	121
7.1	Ursache der Wrinkle-Bildung	121
7.2	Anforderungen an das Anti-Wrinkle-Modul	123
7.3	Funktionsweise und Aufbau des Anti-Wrinkle-Moduls	128
8	Validierung	138
8.1	Nachweis der Vermeidung der Wrinkle-Bildung mit dem Anti-Wrinkle-Modul	138
8.2	Bewertung des Anti-Wrinkle-Moduls	142
9	Zusammenfassung und Ausblick	147
9.1	Zusammenfassung	147
9.2	Ausblick	149
10	Literaturverzeichnis	152
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	V

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Abl.	Ableiter
Al-Kollektor	Aluminium-Kollektor
AS	Antriebsseite
B	Blau
BBD	Box Behnken Design
Bes.	Beschichtung
BS	Bedienerseite
CCD	Central Composite Design
CCI	Central Composite Inscribed Design
CMC	Carboxymethyl Cellulose
CNC	Computerized Numerical Control
CNN	Convolutional Neural Network
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
dim	dimensional
DoE	Design of Experiments
E-Modul	Elastizitätsmodul
FEM	Finite-Elemente-Methode
fps	frames per second
G	Grün
grav.	gravimetrisch
KI	Künstliche Intelligenz
KOS	Koordinatensystem
LAN	Local Area Network
Li-CO	Lithium-Kobaltoxid
Li-FP	Lithium-Eisenphosphat

Li-Ionen	Lithium-Ionen
Li-NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
Li-NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
LiPF ₆	Lithiumhexafluorophosphat (Leitsalz)
MLP	Multi-Layer-Perceptron
MP	Megapixel
NMC 111	Li-NMC-Aktivmaterial mit dem Verhältnis Nickel:Mangan:Kobalt von 1:1:1
NMC 622	Li-NMC-Aktivmaterial mit dem Verhältnis Nickel:Mangan:Kobalt von 6:2:2
NMC 811	Li-NMC-Aktivmaterial im Verhältnis Nickel:Mangan:Kobalt von 8:1:1
NMP	N-Methyl-2-Pyrrolidon
PC	Personal Computer
PVDF	Polyvinylidenfluorid
R	Rot
R2R	Roll-to-Roll – Rollenprozess
RB-Zylinder	Roll-Bending-Zylinder
R-CNN	Region-Based Convolutional Neural Network
REM	Rasterelektronenmikroskop
RGB-Raum	Farbraum, dargestellt mittels der Farben Rot, Grün und Blau
ROI	Region of Interest
RS 232	Recommended Standard 232
SdT	Stand der Technik
SEI	Solid Electrolyte Interface
sek.	Sekunde
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk

unkal	unkalandriert
USB	Universal Serial Bus
vol.	volumetrisch
z.T.	zum Teil

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\% \text{ vol}$	Volumenprozent	-
A	Amplitude – materialabhängige Konstante	-
A_p	Fläche einer Stanzprobe	m ²
B	Potenz – materialabhängige Konstante	-
$B(i, j)$	Blau-Wert an der Stelle i, j in der Aufnahme	-
C_A	Flächenkapazität	mAh/cm ²
c_1, c_2	Steifigkeit	N/m
C	C-Rate: Quotient aus Entlade- oder Ladestrom und der Nennkapazität	h ⁻¹
\tilde{C}	Cauchy-Green-Deformationsgradient	-
d	Materialdicke	µm
$\Delta d_{\text{Beschichtung, unkal}}$	Abstand zweier Punkte auf der Beschichtung einer Elektrode im unkalandrierten Zustand	mm
$\Delta d_{\text{Beschichtung, kal}}$	Abstand zweier Punkte auf der Beschichtung einer Elektrode im kalandrierten Zustand	mm
d_{kal}	kalandrierte Elektrodendicke	µm
$d_{\text{Kollektor}}$	Dicke der Kollektorfolie	µm
$\Delta d_{\text{Kollektor, unkal}}$	Abstand zweier Punkte auf dem Kollektor einer Elektrode im unkalandrierten Zustand	mm
$\Delta d_{\text{Kollektor, kal}}$	Abstand zweier Punkte auf dem Kollektor einer Elektrode im kalandrierten Zustand	mm
d_{unkal}	unkalandrierte Elektrodendicke	µm
d_{Ziel}	zu erzielende kalandrierte Elektrodendicke	µm
F	Deformationsgradient	-
f_{act}	Aktivierungsfunktion	-
\vec{F}_{Ab}	Bahnzugkraft Abwickler	N
\vec{F}_{Auf}	Bahnzugkraft Aufwickler	N

$F_{B,Rand,Ein}$	Bahnzugkraft der Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls an der Einlaufseite	N
$F_{B,Rand,Aus}$	Bahnzugkraft der Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls an der Auslaufseite	N
\vec{F}_{Zug}	Bahnzugkraft Zugwerk	N
F_{Haft}	Haftkraft	N
$F_{Haupt,AS}$	Kraft der Haupt-Zylinder auf der Antriebsseite	N
$F_{Haupt,BS}$	Kraft der Haupt-Zylinder auf der Bedienerseite	N
$F_{Kollektor,plastisch}$	Notwendige Kraft zur plastischen Verformung des Kollektors	N
F_N	Normalkraft	N
$F_{RB,AS}$	Kraft des RB-Zylinders auf der Antriebsseite	N
$F_{RB,BS}$	Kraft des RB-Zylinders auf der Bedienerseite	N
F_{res}	Resultierende Verdichtungskraft von der Kalenderwalze auf die Elektrode	N
$F_{Zustellung}$	Andruckkraft der unteren Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls an die oberen Rollen	N
g	Gravitation	m/s ²
$G(i, j)$	Grün-Wert an der Stelle i, j in der Aufnahme	-
Δh	Höhenunterschied	mm
$\Delta h_{x,Ableiter}$	Höhenunterschied zwischen der Beschichtungskante und der maximalen Auslenkung des Ableiter in z-Richtung im KOS Elektrode quer zur Bearbeitungsrichtung	mm
$\Delta h_{x,Beschichtung}$	Höhenunterschied zwischen der Beschichtungskante und der maximalen Auslenkung des beschichteten Bereichs in z-Richtung im KOS Elektrode quer zur Bearbeitungsrichtung	mm
Δh_y	Höhenunterschied zwischen der minimalen und maximalen Auslenkung des beschichteten Bereichs in z-Richtung im KOS Elektrode in Bearbeitungsrichtung	mm
I	Einheitsmatrix	-
K	Projektion von KOS Kamera n in die Bildebene	-

k_f	Fließspannung	Pa
k_w	Umformwiderstand	Pa
$k_{w,max}$	Maximaler Umformwiderstand	Pa
q_L	Linienlast	N/mm
L	Länge	mm
ΔL	Längenänderung	mm
$l_{\text{Beschichtung,unkal}}$	Abstand zweier Punkte auf der Beschichtung im unkalandrierten Zustand	mm
$l_{\text{Beschichtung,kal}}$	Abstand zweier Punkte auf der Beschichtung im kalandrierten Zustand	mm
$l_{\text{Kollektor}}$	Abstand zweier Punkte auf dem Kollektor	mm
M_B	Massenbeladung	g/cm ²
M_{Brems}	Drehmoment der einlaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls	Nm
M_{Zug}	Drehmoment der auslaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls	Nm
$m_{\text{Elektrode}}$	Masse einer Stanzprobe der Elektrode	mg
$m_{\text{Kollektor}}$	Masse einer Stanzprobe des Kollektors	mg
m_S	Feststoffmasse	mg
o	Über MLP-Netz verarbeiteter Parameter	-
o_i	Eingangsgröße für das MLP-Netz	-
o_j	Ausgangsgröße des MLP-Netzes	-
p	Proportionalitätsfaktor	-
\tilde{R}	Rotationstensor	-
r_1, r_2	Radien der Abschälproben	mm
$R(i, j)$	Rot-Wert an der Stelle i, j in der Aufnahme	-
$R_{2,1}$	Rotationsmatrix von KOS Kamera 2 in das KOS Kamera 1	-
$R_{n,K}$	Rotationsmatrix von KOS Kamera n in das KOS Kalander	-

$RGBSum(i, j)$	Verrechnete R-, G- und B-Werte	-
t	Verschiebung des KOS Kamera 2 zu KOS Kamera 1	-
t_1	Zeitpunkt unmittelbar vor dem Kalandrieren	s
t_2	Zeitpunkt zum Start des Kalandrierens	s
t_3	Zeitpunkt des Eingreifens der einlaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Modul	s
t_4	Zeitpunkt des Eingreifens der auslaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Modul	s
T_{KW}	Temperatur Kalandrierwalze	°C
U	Verzerrungstensor	-
\vec{u}	Verschiebung im KOS Kalender	mm
$v_{Austauf}$	Geschwindigkeit der auslaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls	m/min
V_B	Volumen der Beschichtung der Elektrode	m ³
$v_{Einlauf}$	Geschwindigkeit der einlaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls	m/min
v_{cal}	Kalandriergeschwindigkeit	m/min
v_{KW}	Geschwindigkeit Kalandrierwalze	m/min
$v_{WG,y0}$	Geschwindigkeit des Walzguts vor dem Kalenderspalt	m/min
$v_{WG,y}$	Geschwindigkeit des Walzguts im Kalenderspalt	m/min
$v_{WG,y1}$	Geschwindigkeit des Walzguts nach dem Kalenderspalt	m/min
$v_{WG,a}$	Geschwindigkeit des Walzguts in der Gleitzzone	m/min
$v_{WG,b}$	Geschwindigkeit des Walzguts in der Haftzone	m/min
$v_{WG,c}$	Geschwindigkeit des Walzguts in der Rückstauzone	m/min
w	Wrinkle-Parameter	-

X

Formelzeichen

$w_{i,j}$	Verbindungsgewicht	-
w_L	Wrinkle-Länge	mm
x	x-Achse der Elektrode	-
x_K	x-Achse des Kalanders	-
$\overrightarrow{x_{kal}}$	Ortskoordinate eines gedruckten Punktes auf der kalandrierten Elektrode im KOS Kalanders	mm
$x_{Kalanders}$	Kalanderparameter	-
$x_{SK,1}$	x-Achse der Kamera 1 des Stereokamerasystems	-
$X_{SK,1}$	KOS der Kamera 1 des Stereokamerasystems	-
$x_{SK,2}$	x-Achse der Kamera 2 des Stereokamerasystems	-
$X_{SK,2}$	KOS der Kamera 2 des Stereokamerasystems	-
$X_{SK,n}$	KOS einer Kamera des Stereokamerasystems	-
$\overrightarrow{x_{unkal}}$	Ortskoordinate eines gedruckten Punktes auf der unkalandrierten Elektrode im KOS Kalanders	mm
y	y-Achse der Elektrode	-
y_K	y-Achse des Kalanders	-
$y_{SK,1}$	y-Achse der Kamera 1 des Stereokamerasystems	-
$y_{SK,2}$	y-Achse der Kamera 2 des Stereokamerasystems	-
z	z-Achse der Elektrode	-
z_K	z-Achse des Kalanders	-
α_0	Eingriffswinkel Walzgut zu Walzenspalt	deg
β	Massenabhängigkeit	m ² /s ²
ε	Dehnung	-
ε_B	Porosität der kalandrierten Beschichtung	-

$\varepsilon_{\text{Beschichtung,kal}}$	Dehnung der Beschichtung einer Elektrode im kalandrierten Zustand	-
$\varepsilon_{\text{Besch,plastisch}}$	Plastischer Anteil der Dehnung der Beschichtung einer Elektrode im kalandrierten Zustand	-
$\varepsilon_{\text{Kollektor}}$	Dehnung des Kollektors	-
$\varepsilon_{B,0}$	Porosität der unkalandrierten Beschichtung	-
ε_x	Dehnung in x-Richtung im KOS Elektrode	-
ε_y	Dehnung in y-Richtung im KOS Elektrode	-
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Eigenwerte des Cauchy-Green-Deformationsgradienten	-
μ	Reibwert zwischen Walzgut und Walze	-
Π_E	Verdichtungsgrad	-
ρ	Dichte	g/cm ³
ρ_A	Flächengewicht / Flächenmasse	g/cm ²
$\rho_{B,0}$	Dichte der unkalandrierten Elektrode	g/cm ³
$\rho_{B,i}$	Dichte der kalandrierten Elektrode	g/cm ³
ρ_{Ziel}	Zieldichte der zu kalandrierenden Elektrode	g/cm ³
ρ_s	Feststoffdichte	g/cm ³
σ	Druckspannung	Pa
τ	Tortuosität	-

1 Einleitung

1.1 Motivation

Eine Batterie bezeichnet im Allgemeinen einen Energiespeicher zur Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie (Ketterer & Karl et al. 2009). Batterien werden in drei Varianten untergliedert: in primäre, sekundäre und tertiäre Batterien. Primäre Batterien können zwar über die Umwandlung der chemischen Energie in elektrische Energie entladen jedoch nicht geladen werden. Die sekundäre Batterie lässt beide Richtungen zu, sodass sowohl das Entladen als auch das Laden, aufgrund von reversiblen Reaktionen möglich ist. Tertiäre Batterien beschreiben Energiewandler, wie zum Beispiel die Brennstoffzelle oder Redox-Flow-Batterien. Die Energie wird dabei über einen Stofffluss zugeführt und über zellinterne Reaktionen von chemischer in elektrischer Energie umgewandelt. (Doppelbauer 2020)

Sekundäre Batterien, die eine hohe Anzahl an Entlade- und Ladevorgängen zulassen, finden in vielen Produkten aus verschiedenen Branchen Anwendung. Die Batteriezellen kommen dabei in den Consumer Electronics bis hin zu Batteriesystemen in Fahrzeugen zum Einsatz. Abbildung 1-1 zeigt die verfügbare Energiedichte anhand von den beispielhaften Anwendungen beginnend beim Rohmaterial Elektrode. Je komplexer die Anwendung und je größer der Energiebedarf, desto geringer wird die Energiedichte des Gesamtsystems, da zusätzliche Aggregate und Schutzeinrichtungen notwendig sind. Daher ist in den Anwendungen rund um die Elektromobilität die Maximierung der Energiedichte der einzelnen Batteriezelle von großer Bedeutung.

Die drei wichtigsten Eigenschaften einer Batteriezelle sind die Energiedichte, die Leistungsdichte und die Lebensdauer (Jendrischik & Hüpohl 2010). Bei rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen sind sie maßgeblich für die Reichweite, das Beschleunigungsverhalten sowie die Nutzungsdauer über den Lebenszyklus verantwortlich. Im Allgemeinen hat die Batteriezelle einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Produkte.

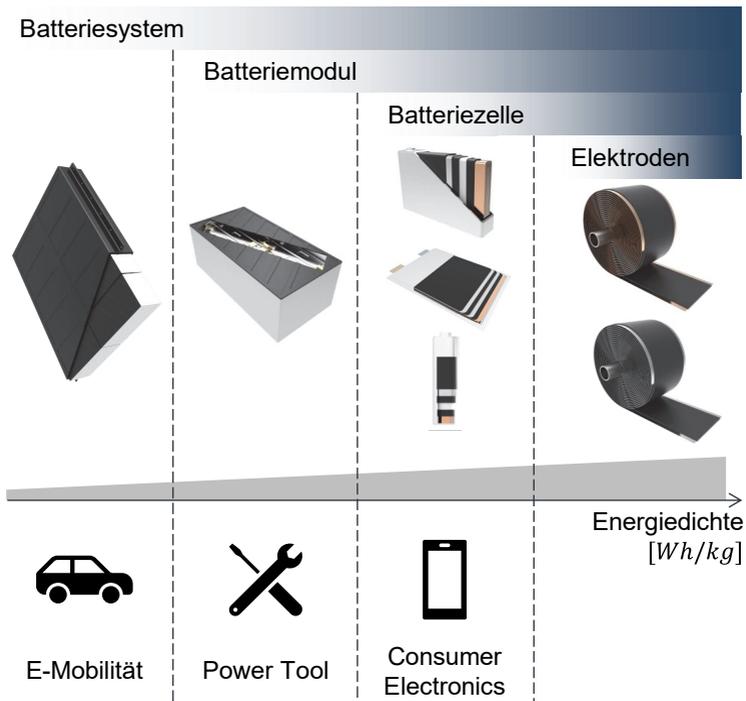


Abbildung 1-1: Energiedichte in Abhängigkeit der Anwendung

Die Steigerung der Energiedichte, der Leistungsdichte und der Lebensdauer lässt sich entweder über das Materialsystem oder durch die Optimierung einzelner Produktionsprozessschritte erzielen (Bold & Fleischer 2018). Neue Materialsysteme mit verbesserten Merkmalen bezüglich der drei genannten Eigenschaften sind bereits in Aussicht (Thielmann & Neef et al. 2017). Deren Prozessierung findet noch in kleinen Mengen statt und eine Hochskalierung führt zu Herausforderungen, die sich erst bei industriellen Fertigungsgrößen zeigen. Aus diesem Grund fallen hohe Entwicklungszeiten noch so lange an, bis neu erforschte Materialien vom Labormaßstab in industriellen Größen hergestellt und verarbeitet werden können. Allein die Entwicklung und Markteinführung der Lithium-Ionen-Batterie der ersten Generation hat 15 Jahre benötigt (Unsel'd 2020).

Bei der Energiedichte wird zwischen der gravimetrischen und der volumetrischen Energiedichte unterschieden. Die gravimetrische Energiedichte beschreibt die Energie des Materials pro Gewichtseinheit. Diese ergibt sich über die Materialzusammensetzung und wird nicht durch die Elektrodenproduktion beeinflusst. Im Gegensatz dazu wird die volumetrische Energiedichte in der Elektrodenproduktion erhöht. Dabei ist der entscheidende Prozessschritt das Kalandrieren. Es handelt sich um einen Walzprozess, welcher die in den Batteriezellen verbauten Elektroden verdichtet und damit eine Steigerung der Energiedichte bewirkt (Kaiser & Wenzel et al. 2014). Eine hohe Verdichtung ist zur Erreichung optimaler Materialeigenschaften, vor allem zur Maximierung der volumetrischen Energiedichte unumgänglich, wenngleich dies eine Ursache für Elektrodendefekte darstellt. Diese erschweren die Weiterverarbeitung oder verhindern sogar die Prozessierung in den nachfolgenden Prozessschritten. Elektroden machen etwa 80 % - 90 % der Qualität einer Batteriezelle aus (Weisenberger & Guth et al. 2014).

Es besteht die Notwendigkeit die Elektrodendefekte beim Kalandrieren in Relation mit den dazugehörigen Produktionsprozessparametern zu bringen. Aus dem resultierenden Prozessverständnis können dann geeignete Gegenmaßnahmen zur Verminderung oder Verhinderung der Elektrodendefekte abgeleitet werden. Dafür eignen sich Modelle zur Beschreibung der Wirkzusammenhänge zwischen Material- und Prozessparametern, aber auch zu vor- und nachgelagerten Prozessschritten. So lassen Modelle zusätzlich Prognosen zur Prozessfähigkeit für noch neue unbekannte Materialien ableiten. Eine Voraussetzung der Modellbildung ist es, sowohl Material- und Prozessparameter als auch die Elektrodendefekte zu quantifizieren.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Hohe volumetrische Energiedichten fordern hohe Verdichtungen beim Kalandrieren der Elektroden. Elektroden sind beschichtete Metallfolien. Bei einer hohen Verdichtung beziehungsweise Belastung des Materials im Kalandrierprozess kommt es zum Phänomen der sogenannten „Wrinkles“. „Wrinkle“ stammt aus dem Englischen und bedeutet „Falte“. Es beschreibt die Falten im unbeschichteten Randbereich. Abbildung 1-2 zeigt die Ausprägung und die Lage der Wrinkles im unbeschichteten Randbereich der Metallfolie. Die Falten beginnen an der Beschichtungskante mit einem Winkel bis zu 20° bezogen auf die Bearbeitungsrichtung im Kalandrierprozess. Die Höhe und die Breite der Falten sind an der Beschichtungskante am größten und flachen zum Elektrodenrand hin ab. Wrinkles kommen in regelmäßigen Abständen vor.

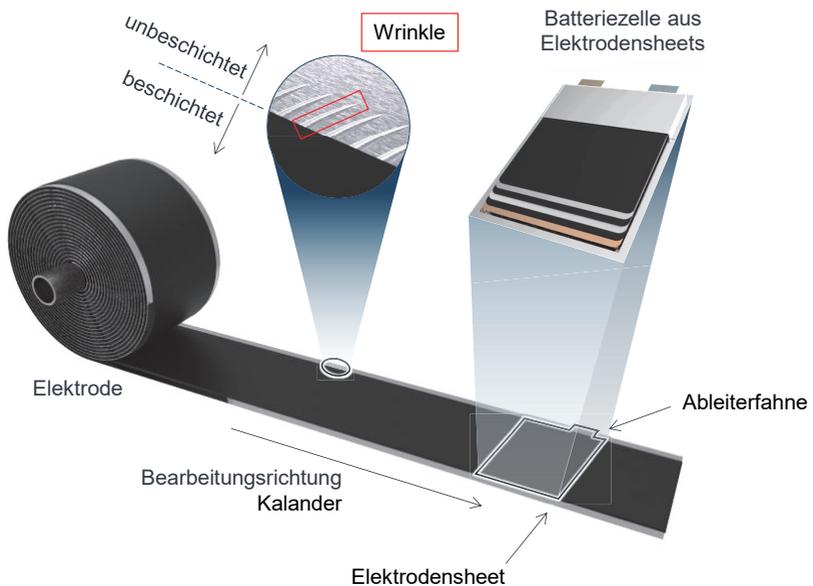


Abbildung 1-2: Lage des Elektrodendefektes „Wrinkle“

Abbildung 1-2 zeigt an welcher Stelle die Auffälligkeit in der Batteriezelle wiederzufinden ist. Die Falten sind auf den Ableiterfahnen der von der Elektrode herausgetrennten Elektrodensheets vorhanden. Die inhomogenen Oberflächeneigenschaften durch die Wrinkles sorgen vor allem im Fügeprozess der Ableiter für Herausforderungen. Damit entsprechen Wrinkles einem Elektrodendefekt, der die nachfolgenden Prozessschritte negativ beeinflusst oder sogar zur völligen Unbrauchbarkeit des Materials führen kann (Bauer 2017; Bold & Fleischer 2018).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Prozessverständnis für das Kalandrieren von Batterieelektroden zu schaffen. Im Fokus steht dabei die Analyse der Wrinkle-Bildung, in der eine quantitative Beschreibung des Elektrodendefektes als auch eine Erläuterung der Ursache der Fehlerentstehung enthalten ist. Die Ursachenidentifikation ist der Ansatz für die Erarbeitung von Gegenmaßnahmen zur Verminderung der Faltenbildung. Die Anforderungen an derartige Gegenmaßnahmen sind eine Adaptierfähigkeit an Kalandrieranlagen, inline im Kalandrierprozess anzugreifen sowie materialunabhängige Lösungen darzustellen.

Die Voraussetzung, um Maßnahmen zur Wrinkle-Vermeidung ableiten zu können, ist das Basiswissen über die Unterschiede zwischen einer ideal funktionierenden Batteriezelle zu einer mangelhaften Batteriezelle. Kapitel 2 beschreibt daher die Funktionsweise und den Aufbau einer einwandfreien Batteriezelle. Zusätzlich werden die Prozessschritte zur Produktion einer Batteriezelle aufgezeigt. Die Beschreibung der Batteriezellherstellung schafft die Voraussetzung zur Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen dem Fehlerbild Wrinkle im Kalandrieren zu den vor- und nachgelagerten Prozessschritten. Mit einer detailreichen Betrachtung des Kalandrierens in Bezug auf die Batteriekennwerte Energiedichte und Kapazität schließt Kapitel 2. Daran anknüpfend werden in Kapitel 3 die allgemeinen Grundlagen zu Walzprozessen erläutert.

Mit dem umfassenden Verständnis zum Kalandrieren folgt eine Betrachtung des aktuellen Stands der Forschung und Technik im Bereich des Kalandrierens von Batterieelektroden. Aufgearbeitet werden sämtliche Elektrodendefekte für das Kalandrieren, ergänzt durch eine qualitative Beschreibung deren Ursachen. Kapitel 3.4 schließt den Bogen zu Kapitel 2 und beschreibt, wie sich die einzelnen Fertigungsprozesse gegenseitig beeinflussen.

Es besteht ein Gegensatz der Optimierung des Kalandrierprozesses bei gleichzeitiger Minimierung der Elektrodendefekte. Die Forschungshypothese in Kapitel 4 beschreibt, dass der Gegensatz sich ausschließlich über ein umfangreiches Eingreifen in den Prozess auflösen lässt.

Für eine detaillierte Ursachenfindung der Wrinkle-Bildung, zeigt Kapitel 5 auf, wie der Kalandrierprozess über Methoden der Qualitätssicherung erweitert ist. Neuentwicklungen an Messsystemen ermöglichen die qualitative Beschreibung der Wrinkles und die Herstellung des Zusammenhangs mit den Kalandrierprozessparametern. Aufgenommen sind dabei geometrische Größen der Falten und Verzerrungswerte der kalandrierten Elektrode, die das Material über den Walzprozess erfährt. Zur Erzeugung aussagekräftiger Ergebnisse ist eine statistische Versuchsplanung aufgestellt. Dabei kommen neu entwickelte Methoden zur Wrinkle-Beschreibung zum Einsatz und die Kalandrierprozessparameter werden variiert.

Kapitel 6 ist eine Zusammenfassung der Versuchsergebnisse über eine Modellbildung. Die Modelle lassen Aussagen der Fehlerausprägung in den Zwischenräumen der Versuchspunkte zu. Erstellt werden die Modelle mithilfe künstlich neuronaler Netze.

Die gewonnenen Erkenntnisse dienen in Kapitel 7 der Beschreibung eines Betriebsoptimums für eine minimale Wrinkle-Bildung für den Kalandriervorgang. Zudem ergibt sich der Bedarf und die Notwendigkeit eines Anti-Wrinkle-Moduls. Die Ursachenbeschreibung der Elektrodendefekte führt zur Herleitung der Funktion eines Anti-Wrinkle-Moduls. Einer Auflistung möglicher Wirkmechanismen und deren Umsetzung folgt eine Bewertung und Entscheidung zur Gestaltung einer Gegenmaßnahme.

Nach der Umsetzung einer materialunabhängigen Maßnahme, die inline im Kalandrierprozess wirkt, folgt der Nachweis und die Validierung der Verminderung der Wrinkle-Bildung. In Kapitel 8 werden dazu die Vorgehensweise und die Methoden aus Kapitel 5 herangezogen und die Güte der Wrinkle-Verminderung bewertet. Abschließend folgen eine Auflistung und Erläuterung der Herausforderungen der derzeitigen Umsetzung für einen laufenden Produktionsbetrieb.

2 Grundlagen der Funktionsweise und Herstellung einer Batteriezelle

2.1 Aufbau und Funktionsweise einer Batteriezelle

Die im Folgenden betrachteten sekundären Batteriezellen werden aufgrund des verwendeten Materials als Lithium-Ionen-Batterien bezeichnet. Die Batterien besitzen einen negativen und einen positiven Pol, über welche die elektrische Energie an den Verbraucher gelangt. Beim Entladen wandern Elektronen von der negativen Elektrode, der Anode, durch den Verbraucher zur positiven Elektrode, der Kathode. Zur Erhaltung des chemischen Gleichgewichtes erfolgt dabei ein Lithium-Ionenfluss von der Anode zur Kathode. Beim Laden der Batteriezelle ist es umgekehrt und die Elektronen fließen von der Kathode zur Anode, sodass der Ionenfluss von der Kathode zur Anode ein Gleichgewicht erzeugt.

Die Elektroden Anode und Kathode sind beschichtete Metallfolien. Die Metallfolien werden als Kollektor oder Stromsammler bezeichnet. Die Elektroden sind in einer hohen Stückzahl mit dem dazwischenliegenden Separator gestapelt oder gewickelt in eine Batteriezelle verbaut. Der zwischen der Anode und der Kathode liegende Separator ist semipermeabel und elektrisch nicht leitfähig. Der Separator ist ausschließlich für die Lithium-Ionen durchlässig, dennoch nicht für die Elektronen. Der Elektronenstrom muss über eine zellexterne Verbindung, den Verbraucher, fließen (Korthauer 2013). Der Aufbau einer Batteriezelle ist in Abbildung 2-1 auf der ersten Ebene „Batteriezelle“ dargestellt, wobei die Inhalte und die Informationen von (Ketterer & Karl et al. 2009) entnommen sind.

Das Trägermaterial der Elektrode, der Kollektor, ist beidseitig mit einer aktiven Masse beschichtet, welche bei Kathoden und Anoden unterschiedlich ausfällt. Anoden enthalten Kupferfolien als Trägermaterial und Graphit als Hauptkomponente der Beschichtung. Der Stromsammler der Kathode ist eine Aluminiumfolie und über die Beschichtung wird ein Lithiummetalloxid aufgetragen. Dazwischen befindet sich der Separator, eine mikroporöse Polymer-Membran, die aus semikristallinen Polyolefinen besteht. Die Reaktionen zwischen den Elektroden ermöglicht der Elektrolyt, eine Flüssigkeit, die sich in den Poren der Beschichtungen und des Separators befindet. (Ketterer & Karl et al. 2009) Der Ionenfluss findet zwischen den beiden sich gegenüberliegenden

Beschichtungen der Anode und der Kathode statt und die Elektronen werden dabei über die Metallfolien nach außen geleitet, dargestellt in Abbildung 2.1 rechts.

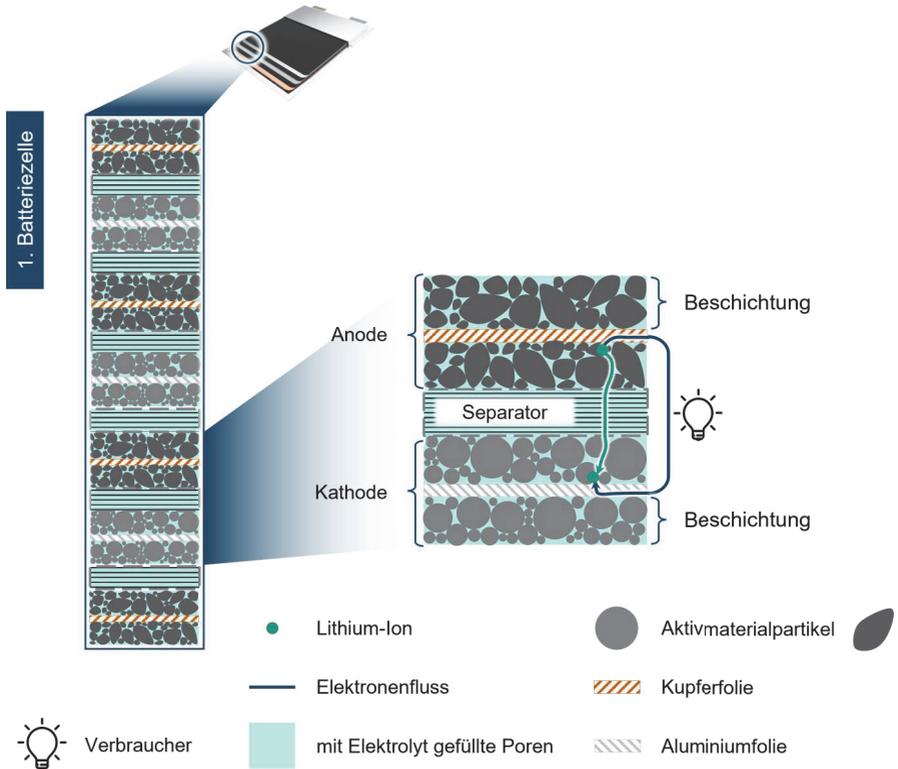


Abbildung 2-1: Aufbau und Funktionsweise einer Batteriezelle
(in Anlehnung an (Ketterer & Karl et al. 2009))

Die Beschichtung enthält Aktivmaterialpartikel, einen Binder und Additive. Der Binder sorgt für den mechanischen Zusammenhalt. Die Additive, wie zum Beispiel Leitruß, Graphene oder Kohlenstofffasern, verbessern die elektrische Leitfähigkeit (Ketterer & Karl et al. 2009). Wie in Abbildung 2-2 auf der zweiten Ebene „Elektrode“ dargestellt, befinden sich die Additive zusammen mit dem Binder auf der Oberfläche der Partikel und zwischen den Partikeln.

Relevante Eigenschaften einer Batteriezelle auf der Elektrodenoberfläche sind die Größen Dichte ρ [g/cm³], Flächenkapazität C_A [mAh/cm²] und Porosität ϵ_B . Diese Größen beziehen sich lediglich auf die Beschichtung, nicht aber auf die Metallfolie. Die Dichte und die Flächenkapazität geben an wie viele Aktivmaterialpartikel sich pro Volumeneinheit beziehungsweise pro Flächeneinheit auf dem Stromsammler befinden. Eine hohe Dichte sowie eine hohe Flächenkapazität sind wichtig, um eine hohe volumetrische Energiedichte zu erreichen. Um dabei ausreichende Transportwege für die Lithium-Ionen zu gewährleisten, ist eine gewisse Mindestporosität der Beschichtung notwendig. Denn die Poren zwischen den Aktivmaterialpartikeln bieten dem Elektrolyt den notwendigen Raum und somit die Grundlage für den Lithium-Ionen-Transport. Eine geringe Porosität entspricht einem geringen Hohlraumvolumen beziehungsweise einem geringen Totraum und führt zu einer hohen volumetrischen Energiedichte. Von Bedeutung ist auch, dass die Poren eine gute Vernetzung aufweisen und in sich nicht geschlossen sind, sodass der Lithium-Ionen-Transport innerhalb der Beschichtung möglich ist. Die Vernetzung der Poren untereinander wird mit der Größe Tortuosität τ beschrieben, wobei eine Tortuosität $\tau = 1$ für eine gute Zugänglichkeit und $\tau = 0$ für eine verschlossene Pore (Bae & Erdonmez et al. 2013) steht. Das Optimierungsziel ist eine geringe Porosität bei maximaler Tortuosität.

In Abbildung 2-2 findet sich eine genauere Darstellung der Aktivmaterialpartikel in der dritten Ebene „Partikel“. Die Graphitpartikel auf der Anodenseite bestehen aus Lagen hexagonal angeordneter Kohlenstoffatome. Sie besitzen Hohlräume, in denen sich Lithium-Ionen einlagern können. Das Aktivmaterial der Kathode ist aus Lagen von Metalloxiden aufgebaut, zwischen deren Schichten sich die Lithium-Ionen einlagern. Ein Partikel entspricht somit einer zusammenhängenden Einheit aus Lagen der Kohlenstoffatome beziehungsweise der Metalloxide. Die in der Elektrodenproduktion eingesetzten Lithiummetalloxid-Partikel bestehen beispielsweise aus kugelförmigen Poly- oder Monokristallen mit einem Durchmesser von rund 10 μm .

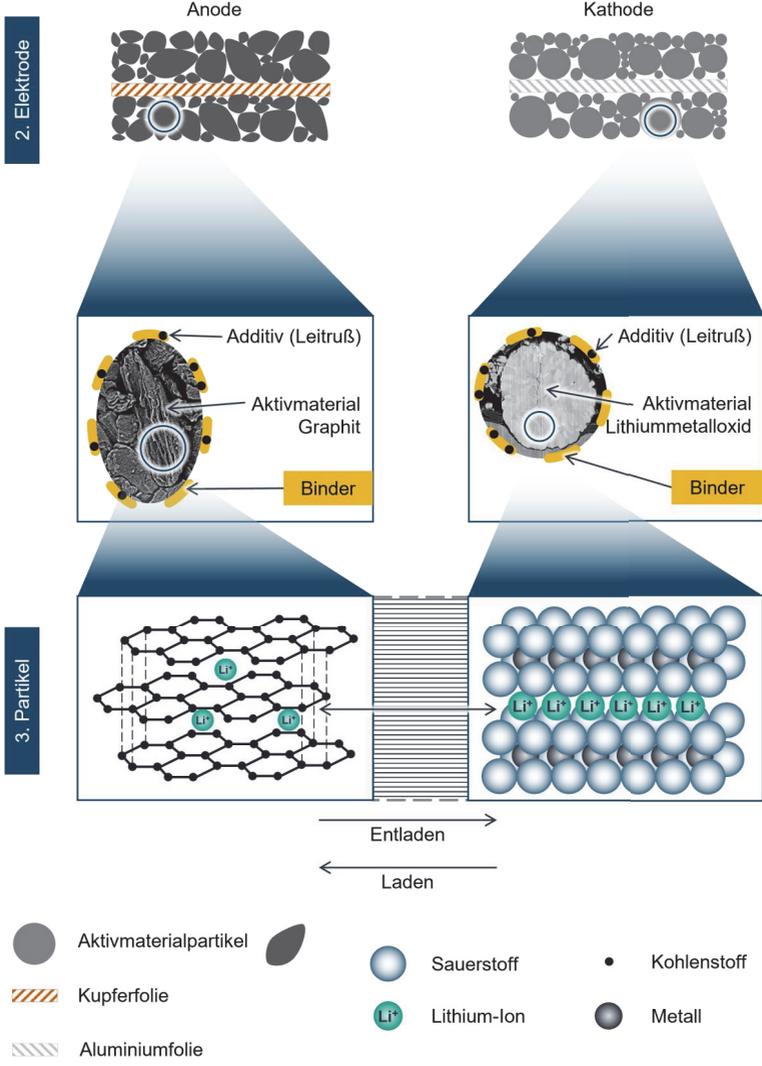


Abbildung 2-2: Aufbau einer Elektrode (in Anlehnung an (Ketterer & Karl et al. 2009))

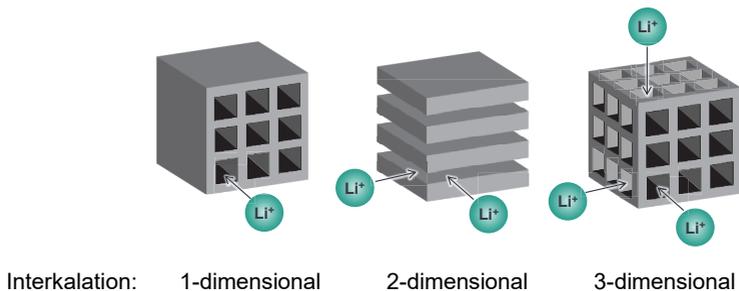
Der Elektrolyt, der sich in allen Lagen der Batteriezelle befindet, ermöglicht es den Lithium-Ionen zu den Aktivmaterialpartikeln zu wandern. Die Interkalation, die Einlagerung der Lithium-Ionen in die Freiräume, ist materialabhängig aus verschiedenen Richtungen möglich. Dargestellt sind die Interkalationsmöglichkeiten aus einer, zwei oder drei Richtungen in Abbildung 2-3. Je höher die Zugänglichkeit der Lithium-Ionen zu den Aktivmaterialpartikeln desto höher sind die Entlade- und Laderaten. Die Entlade- und Laderate, auch als C-Rate bezeichnet, beschreibt mit welcher Stromstärke die Batteriezelle ge- oder entladen wird. Bei 1 C wird die Batteriezelle innerhalb einer Stunde auf die volle Kapazität geladen beziehungsweise kann die komplette Kapazität innerhalb einer Stunde abgerufen werden. Die mögliche Entladeleistung wird für verschiedene Kathodenmaterialien in Tabelle 2-1 aufgezeigt. Die weiteren Eigenschaften und Größen der Aktivmaterialien Nennspannung, volumetrische Energiedichte, gravimetrische Energiedichte, Entladeleistung sowie die Zyklenstabilität sind vergleichend angegeben. Die Zyklenstabilität beschreibt, wie oft ein Entlade- und Ladevorgang durchgeführt werden kann, bis die verfügbare Zellkapazität aufgrund von Alterungsvorgängen unter einem definierten Wert sinkt. Definiert ist dieser Wert über die Zyklenzahl, bei der die Batteriezelle eine Restkapazität von 60 % besitzt. Der Kapazitätswert orientiert sich dabei an der im ersten Zyklus eines Entladevorgangs verfügbaren Batteriezellkapazität. Die Batteriezellkapazität an sich beschreibt die Höhe des Energieinhalts, der in einem Entladevorgang abgerufen werden kann.

Wie in Tabelle 2-1 dargestellt, kann das Kathodenmaterial Li-NMC Lithium-Ionen aus drei Raumrichtungen in dessen Struktur einlagern. Zudem sorgt die hohe volumetrische Energiedichte des Aktivmaterials allgemein für eine häufige Verwendung in Batteriezellen. Andere Materialsysteme, wie Li-NCA, die eine Einlagerung aus zwei Raumrichtungen zulassen, weisen zwar teilweise bessere elektrochemische Eigenschaften, wie eine höhere Energiedichte, auf. Dennoch sprechen Sicherheitsaspekte aufgrund einer instabilen chemischen Verbindung gegen deren Verwendung (Ketterer & Karl et al. 2009). Im direkten Vergleich scheint das Aktivmaterial Li-FP mit allein eindimensionaler Interkalation zwar weniger Vorteile mit sich zu bringen, nichtsdestotrotz verfügt das Material über eine hohe Zyklenstabilität und findet daher ebenso Anwendung im Automobilbereich.

Am häufigsten wird bisher das Lithiummetalloxid Li-NMC verwendet, das durch seinen höheren Kobalt-Anteil die elektrische Leitfähigkeit verbessert, während der Mangan-Anteil die Zyklenstabilität erhöht (Sun & Choi et al. 2015). Die Auswahl des jeweiligen Materialsystems erfolgt anwendungsspezifisch unter Berücksichtigung des optimalen Verhältnisses aus Energiedichte, Leistungsdichte, Sicherheit, Lebensdauer als auch der Materialkosten.

*Tabelle 2-1: Übersicht ausgewählter Kathodenmaterialien
(in Anlehnung an (Ketterer & Karl et al. 2009))*

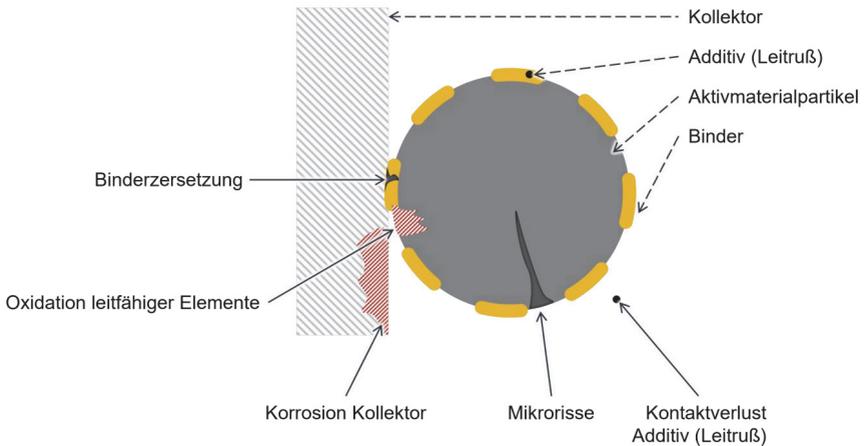
Kathode (Anode)	LiCoO ₂ (Graphit)	LiNiMnCoO ₂ (Graphit)	LiNiCoAlO ₂ (Graphit)	LiFePO ₄ (Graphit)
Bezeichnung	Li-CO	Li-NMC	Li-NCA	Li-FP
Struktur	2-dim	3-dim	2-dim	1-dim
Sicherheit	-	0	-	++
Nennspannung [V]	3,7	3,6 – 3,7	3,6	3,2 – 3,3
vol. Energiedichte [Wh/L]	320 - 500	490 – 580	480 – 670	160 – 260
grav. Energiedichte [Wh/kg]	110 – 180	180 – 210	180 – 250	80 – 120
mögliche C-Raten [h ⁻¹]	1 – 2	1 – 10	1 – 10	10 – 30
Zyklenzahl bei 60% Restkapazität	300 – 500	500 – 1000	500 – 1000	2000 – 5000



*Abbildung 2-3: Interkalation abhängig von der Materialstruktur
(in Anlehnung an (Ketterer & Karl et al. 2009))*

Die Lebensdauer einer Batteriezelle, und damit die Anzahl der möglichen Entlade- und Ladezyklen, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Auf der Partikelebene bestimmt der Zustand eines Partikels und damit die Fähigkeit Lithium-Ionen einzulagern die Lebensdauer. Ein beschädigtes Partikel verliert durch ein Partikelbruch an aktivem Volumen. Abbildung 2-4 zeigt Defekte an einem Partikel innerhalb einer Elektrode, die in einer aktiven Batteriezelle auftreten. Partikelbrüche können durch die Interkalation beziehungsweise die volumenändernde Einlagerung der Lithium-Ionen in die Aktivmaterialpartikel entstehen (Jiang & Hosono et al. 2006). Mangan kann dies verhindern, indem es die Struktur von Li-NMC-Materialien stabilisiert (Vetter & Novák et al. 2005). Bei Graphitanoden kann die Volumenänderung durch die Einlagerung der Lithium-Ionen bis zu 10 % betragen (Ketterer & Karl et al. 2009). Des Weiteren kann es aufgrund von Reaktionsnebenprodukten in der Batteriezelle sowie von Reaktionen während der Elektrodenherstellung zur Oxidation der Aktivmaterialien als auch Korrosion des Kollektors oder einer Binderzersetzung kommen. Bei einer Binderzersetzung kommt es zum Haftungsverlust zwischen den Aktivmaterialpartikeln, von den Partikeln zu den Additiven oder zum Kollektor. Aktivmaterialpartikel besitzen häufig eine eigene Beschichtung, um zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit zu erhöhen. Auch diese kann beschädigt werden.

Die beschriebenen Defekte führen zu einer Steigerung des elektrischen Widerstandes und damit zu einem Kapazitäts- wie auch Leistungsverlust (Vetter & Novák et al. 2005). Im extremen Fall führen lose Partikel zu einem Kurzschluss der Batteriezelle, wenn dabei der Separator durchstoßen wird.



*Abbildung 2-4: Mechanische Alterungseffekte einer Kathode
(in Anlehnung an (Korthauer 2013) und (Vetter & Novák et al. 2005))*

Im folgenden Kapitel 2.2 werden die Prozesse zur Elektrodenherstellung erläutert und es wird auf die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den mechanischen Eigenschaften der Elektrode eingegangen. Anschließend erfolgt die Kopplung zwischen den mikro- und makroskopischen Elektrodendefekten. Für einen Partikelbruch liegt die Ursache nicht allein immer in der Interkalation der Lithium-Ionen, sondern sie kann auch in der Materialherstellung oder in der Elektrodenproduktion liegen.

2.2 Batteriezellproduktion

Die Batteriezellproduktion lässt sich in die Bereiche Elektrodenfertigung, Batteriezellassemblierung sowie Formieren und Prüfen unterteilen, siehe Abbildung 2-5.

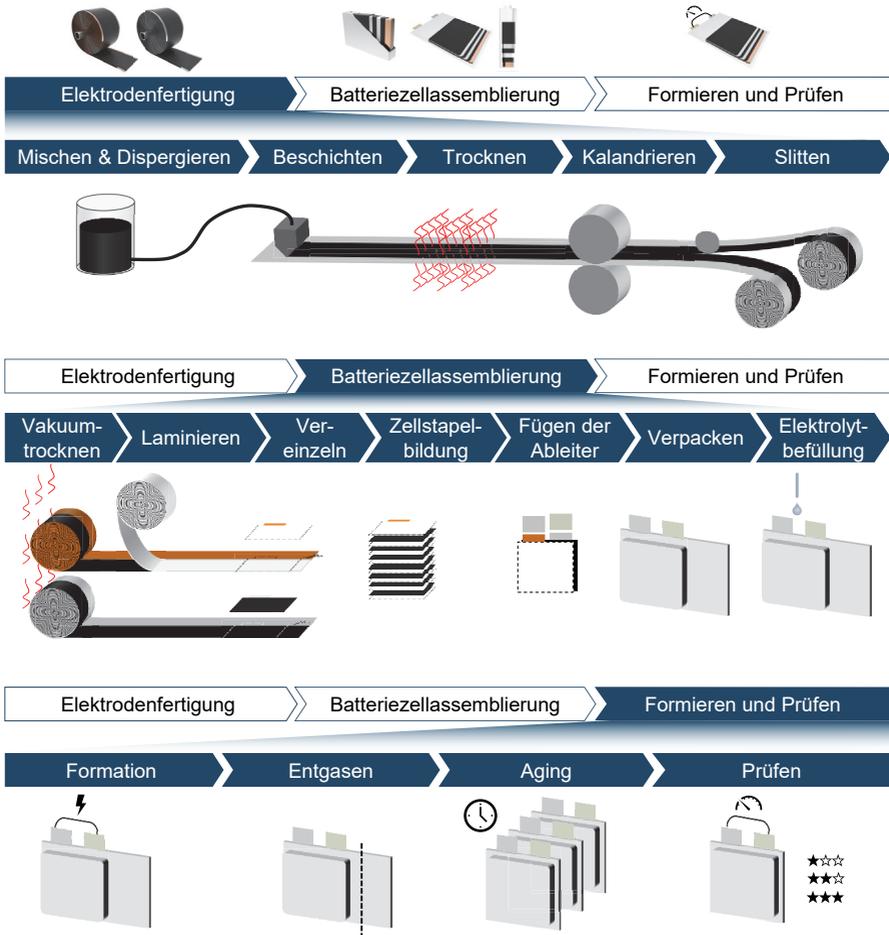


Abbildung 2-5: Prozesskette einer Batteriezellproduktion

Die Elektrodenfertigung ist nach heutigem Stand der Technik ein R2R-Prozess (Roll-to-Roll Prozess), das heißt, dass das Material als Rollenware vorliegt. Dies gilt für die Prozessschritte vom Beschichten bis zur Batteriezellassemblierung. Der Elektrodenproduktion kommt eine hohe Bedeutung zu, da dabei die Kapazität der Elektrode und damit die Leistungsfähigkeit der Batteriezelle bestimmt werden. Zusätzlich zur hohen Kapazität ist eine homogene Stromdichte und somit homogene Eigenschaften über die gesamte Elektrodenfläche zu erzielen (Ketterer & Karl et al. 2009).

Im ersten Schritt der Elektrodenfertigung, der Pasten- oder Slurryherstellung, werden die Komponenten Aktivmaterialpartikel, diverse Additive und ein gelöster Binder zu einer Beschichtungsmasse zusammengeführt. Die Komponenten werden mit einem Lösungsmittel zu einer flüssigen Masse vermischt. Bezüglich der Rezeptur besteht die Herausforderung darin, das Optimum aus einer geringen Lösungsmittelmenge zur verbesserten Trocknung im nachfolgenden Prozessschritt und einem hohen Anteil an Lösungsmittel für eine gute Fließfähigkeit der Paste zu wählen (Kaiser & Wenzel et al. 2014). Für Lithiummetalloxid Kathoden kommt das Lösungsmittel NMP (N-Methyl-2-pyrrolidon) mit dem Binder PVDF (Polyvinylidenfluorid) zum Einsatz. Für Anoden mit Graphitpartikel (> 90 %) ist die Verwendung des Polymerbinders (< 10 %) PVDF (van Schalkwijk & Scrosati 2002) ebenso möglich, aber auch wasserbasierte Lösungsmittel wie CMC (Carboxymethyl Cellulose) und der Binder SBR (Styrol-Butadien-Kautschuk) werden verwendet (Ketterer & Karl et al. 2009). Die Anodenpartikel können Silizium beinhalten, sodass die theoretische Energiedichte höher ist, wobei die Interkalation der Lithium-Ionen eine höhere Volumenausdehnung verursacht, was nachteilig ist (He & Huang et al. 2021). Wichtig beim Mischen ist unter anderem die Kenntnis der mechanischen und thermischen Stabilität des Binders, damit keine Materialschäden im Sinne eines Haftungsverlusts auftreten (Kaiser & Wenzel et al. 2014).

Die Anteile der beigefügten Komponenten haben Einfluss auf die mechanischen wie auch auf die elektrochemischen Eigenschaften. Zusätzlich zur prozentualen Verteilung der einzelnen Inhaltsstoffe ist die Partikelgröße der Aktivmaterialpartikel von entscheidender Bedeutung. Die Elektrode einer Hochleistungszelle besitzt kleine Partikel, ist dünn beschichtet (~ 30 µm) und bietet eine große Oberfläche. Große Partikel und eine dicke Beschichtung (~ 200 µm) werden in Elektroden für Hochenergiezellen verwendet (Ketterer & Karl et al. 2009). Hochleistungszellen ermöglichen ein schnelles Abrufen der Energie. Hochenergiezellen weisen zwar eine hohe Kapazität auf, können die Energie jedoch nur mit geringen Stromraten abgeben.

Die Reihenfolge der Zugabe der Stoffe hat Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Elektrode (Kim & Jeon et al. 1999). Entscheidend dabei ist, ob der im Lösungsmittel gelöste Binder erst nach dem Trockenmischen beigefügt wird, sogenanntes Dispergieren, oder ob er zu Beginn Bestandteil des Mischvorgangs ist.

Die Pastenqualität ist von dem Mischprinzip, der Mischgeometrie, den Mengenverhältnissen, der Verarbeitungstemperatur und der Mischatmosphäre abhängig (Ketterer & Karl et al. 2009; Kaiser & Wenzel et al. 2014). Ebenso ist der Faktor Zeit zwischen der Fertigstellung der Paste und dem Beschichten zu beachten. Eine zum Beispiel über 20 Stunden gelagerte Kathodenpaste weist eine um 50 % erhöhte Viskosität im Vergleich zum Ausgangszustand auf, wobei diese Differenz von der Beanspruchung, der Scherrate, und dem Bindersystem abhängig ist (Kaiser & Wenzel et al. 2014). Die Scherrate gibt an, mit welchen Scherkräften in welchem Zeitraum, die Paste, zum Beispiel über die Mischgeometrie, beansprucht wird.

Im darauffolgenden Beschichtungsprozess wird die Paste auf den Kollektor aufgebracht. Das Beschichten ist mit einer Schlitzdüse oder einer Rakel möglich, über deren Einsatz unter anderem die zu beschichtende Menge entscheidet. Bei der Beschichtung mit der Schlitzdüse ist die Geometrie innerhalb der Düse von Relevanz. Die Paste wird über einen Schlauchanschluss punktuell der Düse zugeführt und verteilt sich innerhalb der Düse über die komplette Beschichtungsbreite. Die Geometrie bedingt unterschiedliche Geschwindigkeiten an unterschiedlichen Stellen in der Düse. Die Verteilung der Paste führt in den Randbereichen der Schlitzdüse im Vergleich zur Düsenmitte zu hohen Scherkräften. In Abbildung 2-6 ist die Viskosität über die Scherrate aufgetragen. Die Erhöhung der Scherrate und damit die Belastung für die Paste führt zu einer Verringerung der Viskosität und somit zu einer Erhöhung der Fließfähigkeit. Die Zusammenhänge zeigen ein enges Prozessfenster auf und verdeutlichen die große Bedeutung der Pasteneigenschaften für den Beschichtungsprozess.

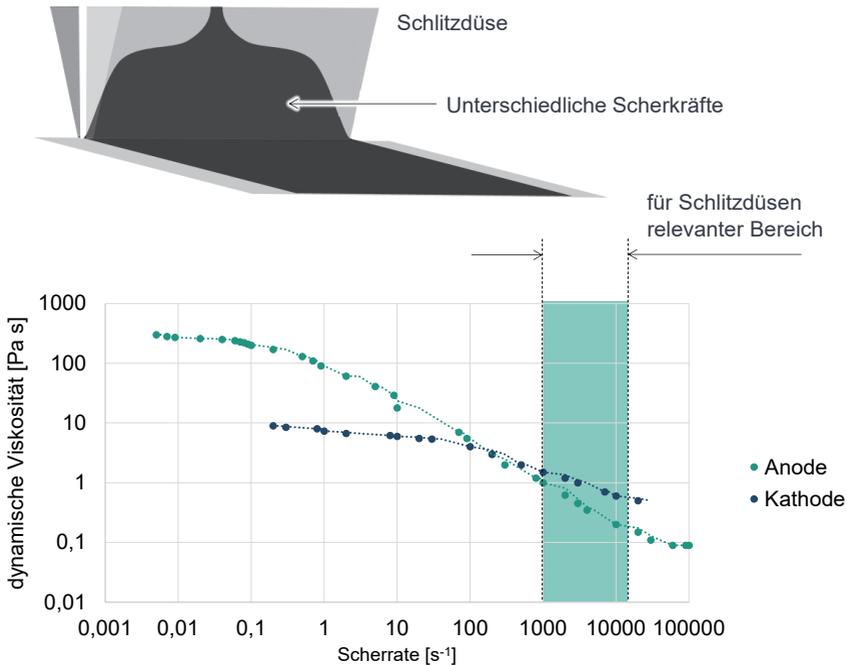


Abbildung 2-6: Abhängigkeit der Viskosität von der Scherrate
(in Anlehnung an (Kaiser & Wenzel et al. 2014))

Aus den oben genannten Gründen stellen die Viskosität, die Scherrate, die Oberflächenspannung und der Feststoffanteil der Paste Eingangsgrößen für den Beschichtungsprozess dar. Eine weitere Eingangsgröße ist die Vorbehandlung des Kollektors, um die Benetzungseigenschaft zu verbessern oder Verschmutzungen zu entfernen. Ausgangsgrößen und im Prozess zu messende Größen sind das Flächengewicht, die Qualität der Beschichtungskante und die Filmdicke. Die Homogenität des Films wird dabei über das Flächengewicht bewertet, das im nassen, wie auch im trocknen Zustand gemessen wird. Das Flächengewicht gibt die Beschichtungsmasse pro Flächeneinheit an. Kantenüberhöhungen oder eine ungleichmäßige Verteilung der Paste werden im ersten Schritt über die Prozessparameter angepasst. Prozessparameter für den Beschichtungsvorgang sind der Abstand der Düse zum Kollektor, die Geschwindigkeit des

Stromsammlers sowie der Druck in der Pastenzuführung. Lassen die Prozessparameter keine Qualitätsverbesserung zu, so ist das Fließverhalten der Paste anzupassen.

Die Beschichtung kann als durchgehender Film oder intermittiert aufgetragen werden. Intermittierte Beschichtungen, eine Beschichtung mit Beschichtungslücken quer zur Bearbeitungsrichtung, können lediglich über Schlitzdüsen gefertigt werden. Die Zuführung der Paste auf den Kollektor wird regelmäßig unterbrochen, indem die Paste in der Schlitzdüse über einen Unterdruck zurückgehalten wird. Hierbei sind die Ausprägungen der Start- und Stoppkanten ein Qualitätsmerkmal, das mit der Beschichtungsgeschwindigkeit und der Viskosität der Paste zusammenhängt (van Schalkwijk & Scrosati 2002).

Dem Beschichten folgt das Trocknen der Elektroden, wobei das Lösungsmittel verdunstet und die Aktivmaterialpartikel inklusive Additive und Binder an dem Stromsammeler verbleiben. Die Anlage des Beschichtungsprozesses inkludiert die Trocknereinheit, wobei mit höheren Beschichtungsgeschwindigkeiten die Trocknerlänge steigt. Entscheidend dabei ist die eingebrachte Wärme in den Prozess, die mit der Trocknungsrate beschrieben wird und abhängig von der Temperatur und von dem Volumenstrom ist. Die getrocknete Elektrode muss hierbei eine homogene Beschichtungsdicke, eine hohe Haftung und eine gleichmäßige Verteilung der Partikel, Additive und des Binders über die Dicke aufweisen. Die Haftung zwischen der Beschichtung und dem Kollektor sorgt sowohl für eine fehlerfreie Handhabung in der Produktion als auch für eine gute Leitfähigkeit. Für die Bewertung der Haftung muss zwischen der Adhäsionskraft, bei Versagen zwischen der Beschichtung und dem Stromsammeler, und der Kohäsionskraft im Falle einer Schwachstelle innerhalb der Beschichtung, unterschieden werden. Eine gute Kohäsion ist zum einen für die Handhabung innerhalb der Produktionsprozesse wichtig und zum anderen in der Zellanwendung vonnöten, um die erforderlichen Volumenänderungen bei der Interkalation der Lithium-Ionen in die Beschichtung zu erlauben. Dies bedeutet, dass mit einer möglichst geringen Menge des inaktiven Binders eine maximale Haftung der Partikel untereinander und zum Kollektor ermöglicht werden muss (Ketterer & Karl et al. 2009). Weiterhin sollten sich aufgrund der Filmschrumpfung der Beschichtung keine Risse oder Unebenheiten, vor allem bei dicken Beschichtungen ($> 120 \mu\text{m}$) und hohen Trocknungsraten, ausbilden. Trocknungsanlagen können als Schwebebahntrockner, Saugstrahltrockner oder Rollenbahntrockner ausgeführt sein (Ketterer & Karl et al. 2009). Die Elektrode wird nach dem Trocknen aufgewickelt und im Prozessschritt Kalandrieren weiterverarbeitet.

Das Kalandrieren (aus dem Französischem „calandre“, auf Deutsch „Rolle“) ist ein Walzvorgang, bei dem die getrocknete Beschichtung auf dem Stromsammel verdichtet wird. Abbildung 2-7 zeigt das Kalandrieren einer Kathode mit NMC 811-Aktivmaterialpartikel im Querschnitt. Das Verdampfen des Lösungsmittels durch den Trocknungsvorgang hinterlässt Hohlräume zwischen den Aktivmaterialpartikeln. Ziel des Kalandrierens ist es, über die Verminderung des Volumens und der Hohlräume, die volumetrische Energiedichte zu erhöhen, die Aktivmaterialpartikel in Kontakt zu bringen und dabei das Optimum zwischen der Porosität und einer hohen Verdichtung unter Beachtung der Tortuosität zu erreichen. Die Poren sollten nach dem Kalandrieren trotz minimaler Porosität eine hohe Vernetzung aufweisen. Zudem werden dabei die Haftung und der elektrische Innenwiderstand verbessert. Die gravimetrische Energiedichte der Aktivmaterialpartikel bleibt hingegen unverändert.

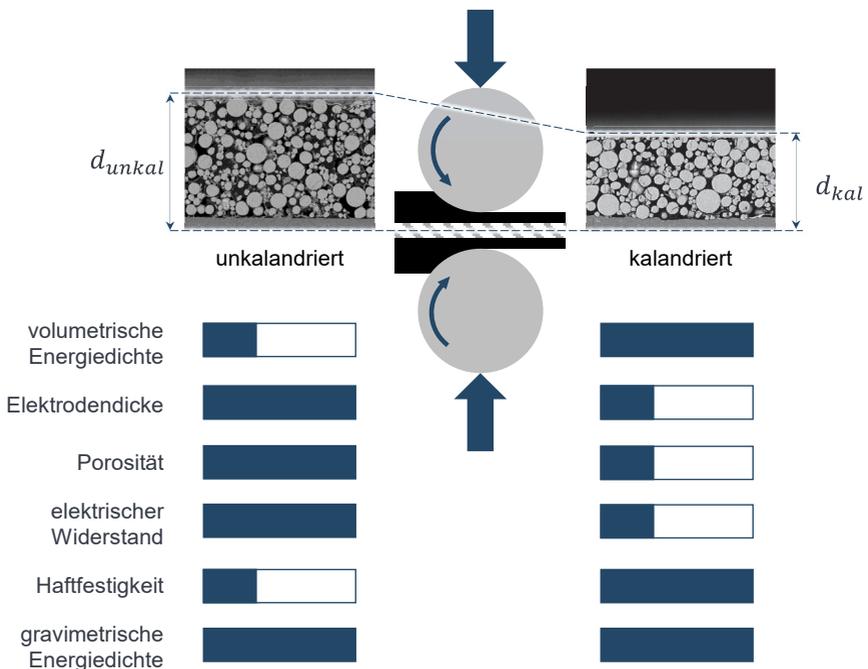


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des Kalandrierens und dessen Einfluss auf die Materialeigenschaften

Vor der eigentlichen Zellstapelbildung erfolgt ein Vakuumtrocknen der Elektrodenwickel. Restliche Mengen an Lösungsmittel werden entfernt, sodass es zu keinen Einbußen für die Batteriezelleistung kommt. Für die Anode folgt optional ein Laminiervorgang, bei dem der Separator mit der Anodenbeschichtung gefügt wird.

Im nächsten Produktionsschritt erfolgt abhängig vom Batteriezellendesign die Vereinzelung der Elektroden. Im Vorfeld findet formatabhängig ein Längsschneiden, Slitten, der Elektroden statt. Das Elektrodenblatt wird dabei entweder über einen Stanzprozess (Punching), über ein Lasertrennverfahren oder über eine Kombination aus beiden herausgetrennt. Ein Stanzprozess erzeugt im Vergleich zum Lasertrennverfahren ein Stanzgitterrest und somit einen höheren Ausschuss. Der Laser bringt wiederum Wärme in den Trennbereich ein und dekonstruiert das Aktivmaterial an den Schnittkanten. Die Kombination aus beiden Prozessen ist bei durchgehenden Beschichtungen möglich. Hierbei werden die Ableiterflächen über ein Stanzverfahren herausgetrennt und es erfolgt lediglich ein Laserquerschnitt zum Abtrennen der einzelnen Elektrodenblätter. Der Vorteil in der Kombination der beiden Verfahren liegt darin, dass ein kontinuierliches Verfahren möglich ist. Im Gegensatz dazu fordert ein reines Stanz- oder Lasertrennverfahren ein kurzzeitiges Anhalten der Elektrodenbahn und stellen somit eine diskontinuierliche Produktion dar.

Abbildung 2-8 unterscheidet die Verwendungsmöglichkeit zwischen der kontinuierlichen Beschichtung und der intermittierten Beschichtung in den unterschiedlichen Batteriezelltypen für den Vereinzelungsvorgang. Die zylindrische und prismatische Zelle beschreibt über die Bezeichnung die jeweilige geometrische Form. Die Elektroden sind in den Zelltypen als Wickel verbaut. Die Namensgebung der Pouch-Zelle entstammt der Pouch-Folie als Verpackung, eine Aluminiumverbundfolie. Die Elektroden in der Pouch-Zelle sind gestapelt.

Das heraustrennbare Elektrodenblatt, siehe Abbildung 2-8, ist bei der intermittierten Beschichtungsvariante durch die Beschichtungsbreite begrenzt. Aufgrund dessen lassen sich prismatisch gewickelte Zellen nur über durchgehend beschichtete Elektroden produzieren. Durchgehende Beschichtungen können ein- oder mehrstreifig hergestellt werden. Eine durchgehend mehrstreifige Beschichtung erhöht die Produktionskapazität. Eine durchgehende Beschichtung ermöglicht eine größere Freiheit in der Verwendung Elektroden für unterschiedliche Batteriezellgeometrien. Zudem kann die Effektivität durch eine durchgehend mehrstreifige Beschichtung erhöht werden. Durchgehende Beschichtungen sind weiterhin aufgrund der fehlenden Anforderungen an die Start- und

Stoppkanten einfacher zu prozessieren. Dies betrifft den Beschichtungs- und den Kalandrierprozess. Die Start- und Stoppkanten müssen beim Beschichten jeweils exakt übereinander liegen und dürfen keine Überhöhungen oder Abflachungen der Elektrodendicke aufweisen. Weiterhin fordert die intermittierende Beschichtung an den Kalandrierprozess eine hohe Genauigkeit an das An- und Abfahrverhalten der Kalenderwalzen an den Start- und Stoppkanten. Die Intermittierungslücke darf nicht mitgewalzt werden, da dadurch neben der Beschädigung der Kalenderwalzen die Eigenschaften der Ableiterfolie verändert würden. Eine durchgehende Beschichtung bringt somit zusätzlich zur Flexibilität weitere Vorteile mit sich und wird für die weitere Betrachtung als Optimum festgelegt.

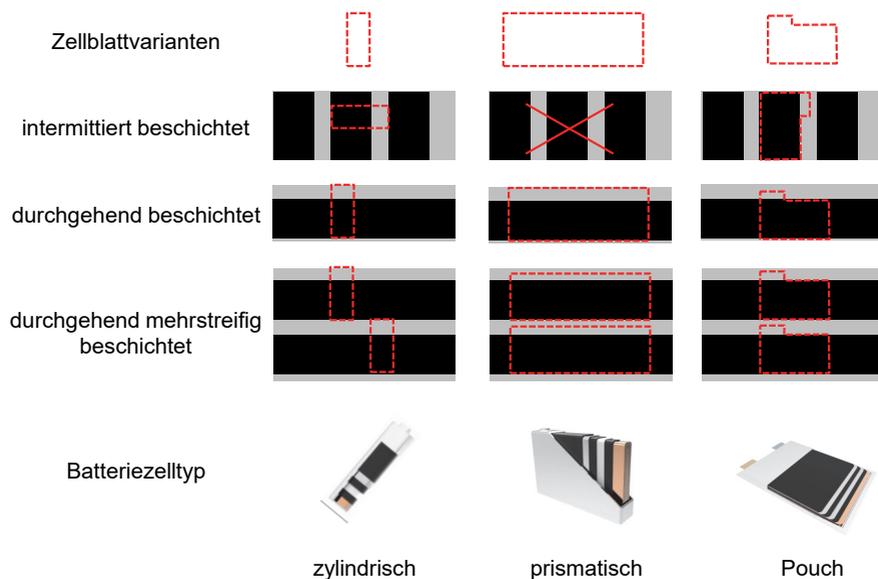


Abbildung 2-8: Elektrodenlayouts in Abhängigkeit von dem Batteriezelltyp

Die hergestellten und zugeschnittenen Elektrodenblätter werden mit dem Separator zur Batteriezelle gewickelt oder gestapelt. In den unbeschichteten Bereichen erfolgt die Kontaktierung der Ableiterbleche. Darauf folgend wird der Zellstapel in die Verpackung gebracht und die Elektrolytbefüllung folgt. Zylindrische oder prismatische Zellen besitzen ein Hardcase-Gehäuse. Prismatische Zellen in einem gestapelten oder gewickelten Aufbau können auch in einer Pouch-Verpackung untergebracht werden. Ein Hardcase-

Gehäuse weist zur Elektrolytbefüllung ein Ventil auf. Pouch-Zellen werden zur Elektrolytbefüllung lediglich an drei Seiten versiegelt, da die den Ableitern gegenüberliegende Seite für das Befüllen vorgesehen ist. Die Elektrolytbefüllung sieht im ersten Schritt ein Vakuumieren vor. Im Anschluss erfolgt das eigentliche Befüllen und Benetzen der Poren der Beschichtung über den Kapillareffekt.

In der anschließenden Formierung wird die Batteriezelle mit Strom- und Spannungslasten beaufschlagt. Dabei bildet sich an der Anode eine Grenzschicht, die sogenannte SEI (Solid Electrolyte Interface), aus Zersetzungsprodukten des Elektrolyten (Ketterer & Karl et al. 2009). Diese ist für die Entlade- und Ladevorgänge notwendig, damit sich die Lithium-Ionen in die Anodenstruktur einlagern und sie von dort wieder mithilfe der Moleküle des Elektrolyten an die Kathode gelangen können. Des Weiteren verhindert die SEI spontane Reaktionen des Graphits mit dem Elektrolyten und erzeugt eine gute elektrische Leitfähigkeit zwischen den Aktivmaterialpartikeln und dem Elektrolyten (van Schalkwijk & Scrosati 2002). Beim Formieren entstehen Gase, die bei Pouch-Zellen in eine separate Gastasche geführt werden. Diese wird nach der Formierung versiegelt und abgetrennt. Bei Hardcase Zellen können die Formiergase über ein Ventil abgeleitet werden.

Nach dem Formieren und der Zyklisierung werden die Batteriezellen in einem Zeitraum von zwei Wochen bis zu einem Monat eingelagert, das sogenannte Aging. Unterscheiden sich bei der Prüfung die anfängliche Spannung von der Spannung nach der Lagerung, so liegt ein interner Kurzschluss vor und die Batteriezelle wird aussortiert (van Schalkwijk & Scrosati 2002). Die Prüfung der Batteriezellen ist auch für die Unterteilung der Batteriezellen in Klassen notwendig, da die erreichbare Kapazität Prozessschwankungen unterliegt und somit eine Varianz vorhanden ist.

Die erreichte Kapazität einer Batteriezelle wird im Allgemeinen über das Material bestimmt und wird von den Prozessschritten beeinflusst. Das Kalandrieren spielt dabei eine entscheidende Rolle. Abbildung 2-9 zeigt den Unterschied der Kapazität für eine Batteriezelle mit unkalandrierten ($\rho_{B,0} = 2,30 \text{ g/cm}^3$) wie auch kalandrierten Elektroden ($\rho_{B,1} = 2,55 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{B,2} = 2,80 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{B,3} = 3,05 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{B,4} = 3,30 \text{ g/cm}^3$) in unterschiedlichen Verdichtungsstufen. Die Batteriezelle beinhaltet das Aktivmaterial NMC 811 auf der Kathodenseite und eine Graphitanode. Die Daten in Abbildung 2-9 tragen die erreichten Kapazitäten für einlagige Knopfzellen über die C-Rate auf. Die Kapazität orientiert sich am Ausgangswert, der für alle Proben gleich ist. Das Laden der

Batteriezellen in Abbildung 2-9 erfolgt konstant über C/5 und die Entladeraten werden über die aufgetragene Werte von C/5 bis 5C variiert. Für jede Entladerate sind zwei Ergebniswerte aufgetragen.

Die Ergebnisse in Abbildung 2-9 zeigen zum einen, dass die anfängliche Kapazität auch nach den Entlade- und Ladeversuchen mit unterschiedlichen C-Raten erreicht wird und somit kein Versagen der Batteriezelle aufgetreten ist. Eine höhere C-Rate bedeutet eine geringe Entladezeit, wenngleich höhere Ströme wirken und daraus resultierend eine geringere verfügbare Kapazität vorhanden ist. Dieses Verhalten ist bei allen Proben zu erkennen. Die unterschiedlichen Dichtestufen lassen dennoch unterschiedliche Kapazitäten zu. Für geringe C-Raten sind die Unterschiede nicht deutlich erkennbar. Bei hohen C-Raten sind Differenzen zu erkennen, da der Verdichtungsgrad die Zugänglichkeit über die Pfade zwischen den Aktivmaterialpartikeln für die Lithium-Ionen bestimmt. Die Lithium-Ionen benötigen für hohe C-Raten eine gute Zugänglichkeit, aber auch kurze Wege und somit einen optimalen Verdichtungsgrad. Ist der Verdichtungsgrad zu hoch, werden nicht nur die Transportwege verschlossen, sondern auch Partikelbrüche verursacht. Ein Partikelbruch führt zu Einbußen in der verfügbaren Batteriezellkapazität, siehe Kapitel 2.1. Das Ergebnis aus Abbildung 2-9 zeigt, dass die maximal erreichbare Batteriezellkapazität nicht mit einer maximalen Verdichtung einhergeht, sondern es ein Optimum ($\rho_{B,1} = 2,55 \text{ g/cm}^3$) zwischen der unkalandrierten und sehr hoch verdichteten Elektrode gibt. Die Parameter Porosität, Tortuosität und Partikelbrüche wirken sich somit ab einem gewissen Verdichtungsgrad und damit ab einer hohen Dichte negativ auf die Elektrode aus.

Es ist zu beachten, dass die Verdichtung und damit die volumetrische Energiedichte der Elektrode nicht linear mit der Kapazität zusammenhängt. Die Effekte und die Beeinflussung auf das Ergebnis einer Knopfzelle wirken sich bei unterschiedlichen Zellformaten individuell aus. Einen Vergleich zwischen einer Knopf- und einer Pouch-Zelle zeigt (Bridgewater & Capener et al. 2021) auf. Nichtsdestotrotz ist festzuhalten, dass das Kalandrieren in Summe zu verbesserten Eigenschaften der Zelleistung führt.

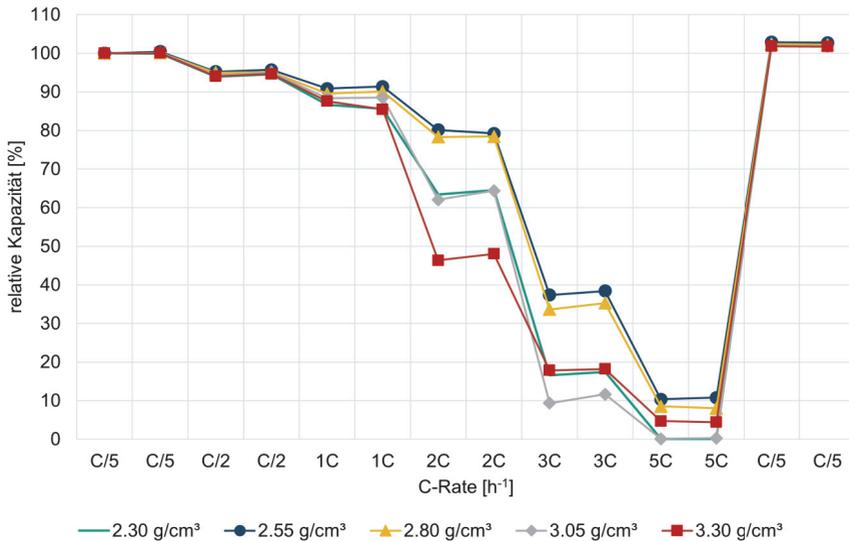


Abbildung 2-9: Kapazität in Abhängigkeit von der Elektrodendichte
(in Anlehnung an (Mayer & Wurba et al. 2021))

2.3 Kalandrieren

2.3.1 Verbesserungen der elektrochemischen Eigenschaften

Das primäre Ziel des Kalandrierens ist das Erhöhen der volumetrischen Energiedichte durch das Verdichten der Elektrodenbeschichtung. Die auf die Beschichtung wirkende Kraft wird dabei mit der Prozessgröße Linienlast in N/mm beschrieben.

Das Kalandrieren hat, wie abschließend in Kapitel 2.2 aufgezeigt, einen signifikanten Einfluss auf die Batteriezellkapazität. Entscheidend dafür sind die sich verändernden Eigenschaften durch das Verdichten der Beschichtung. Hauptsächlich wird die volumetrische Energiedichte über die Verringerung der Dicke erhöht. Die Verbesserung der elektrochemischen Eigenschaften erfolgt über die Verringerung der Porosität und dadurch die Verkürzung der Wege, die die Lithium-Ionen zurücklegen müssen.

Eine entscheidende Eigenschaft des Kalandrierergebnisses ist die zu erzielende Porosität ε_B , die über die Formel 2-1 bestimmt wird (Stieß 2009). Berechnet wird dabei das Verhältnis des Volumens der Beschichtung der Elektrode V_B zum Volumen der

Aktivmaterialpartikel, die in der Formel als Feststoff (S) bezeichnet werden. Das Kalandrieren führt zu kleineren Porengrößen (Kang & Lim et al. 2017) und verminderten der Porosität.

$$\varepsilon_B = 1 - \frac{m_S}{\rho_S V_B}$$

ε_B : Porosität

m_S : Masse Feststoff

ρ_S : Dichte Feststoff

V_B : Volumen der Beschichtung der Elektrode

2-1

Das Kalandrieren verändert das Material nicht nur in der Porosität, sondern es werden zusätzlich die Eigenschaften elektrische und ionische Leitfähigkeit sowie die Haftfestigkeit beeinflusst. Eine verbesserte Haftung zwischen der Beschichtung und dem Stromsammeler und verbesserte Partikel-Partikel-Kontakte sorgen für eine gute elektrische Leitfähigkeit. Die ionische Leitfähigkeit benötigt eine gute Zugänglichkeit zur Aktivmaterialoberfläche, wobei im Gegensatz zur elektrischen Leitfähigkeit Partikel-Partikel-Kontaktstellen hinderlich sind. Aus diesem Grund ist bei der Wahl der geeigneten Porosität das Optimum zwischen der elektrischen und der ionischen Leitfähigkeit zu ermitteln (Sangrós Giménez & Schilde et al. 2020). Die Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit durch das Kalandrieren ist in Abbildung 2-10 belegt. (Rauscher 2014) zeigt, dass eine höhere Linienlast und somit eine hohe Verdichtung zur verbesserten Leitfähigkeit, gemessen von der Kollektorfolie zur Beschichtungsoberfläche, führt.

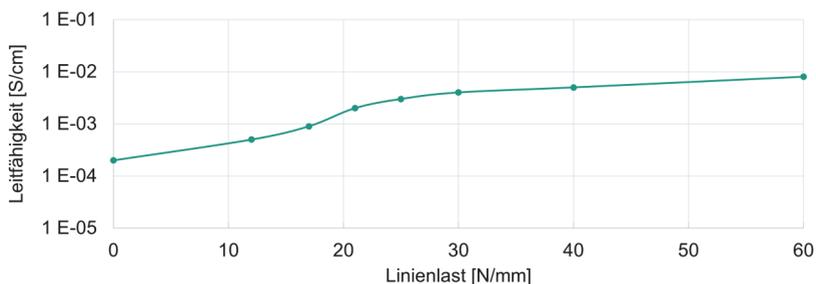


Abbildung 2-10: Einfluss des Kalandrierens auf die elektrische Leitfähigkeit (in Anlehnung an (Rauscher 2014))

In Summe bewirkt ein optimales Kalandrieren eine Verbesserung der Zyklenstabilität (Tran & Greco et al. 2012). Die nachstehenden Kurven in Abbildung 2-11 zeigen den positiven Einfluss der Kalandrierung auf die Batteriezelleigenschaften über unterschiedliche Verdichtungsstufen. Die erreichte Kapazität ist dabei über die Zyklenzahl für verschiedene Porosität aufgetragen. Die Batteriezellen, bestehend aus einer NMC 111-Kathode und reinem Lithium als Gegenelektrode, wurden sowohl mit einer Lade- als auch mit einer Entladerate von C/10 betrieben. Eine Porosität von 0 % bedeutet, dass die Elektrode so stark kalandriert wurde, dass keine Poren an der Oberfläche messbar sind. Die Elektroden mit einer Porosität von 50 % sind unkalandriert. Geringe Leistungsgrade bei Elektroden mit geringer Porosität sind auf eine geringe Porenanzahl und -größe und den blockierenden Effekt des Binders zurückzuführen, die den Lithium-Ionen-Transport durch die Isolation der Aktivmaterialpartikel verhindern. Ein verstärkender Effekt ist das Verschließen der Elektrodenoberfläche bei hohen Verdichtungsgraden. Der Effekt ist in Abbildung 2-11 bei hohen Zyklenzahlen zu erkennen. Die spezifische Kapazität der Elektrode mit 30 % Porosität ist höher als die spezifische Kapazität der Elektrode mit 20 % Porosität, aber auch höher als die Elektroden mit 40 % und 50 % Porosität. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass das Kalandrieren einem engen Prozessfenster zum Erreichen der optimalen Porosität unterliegt, da die spezifische Kapazität mit sinkender Porosität überproportional fällt.

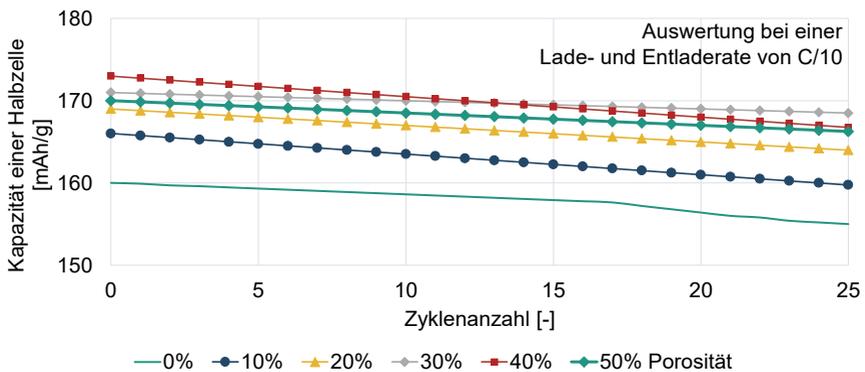


Abbildung 2-11: Einfluss des Kalandrierens auf die Batteriezellkapazität
(in Anlehnung an (Zheng & Tan et al. 2012))

Die Porosität ist derzeit inline nicht messbar. Daher wird die Materialdicke detektiert und zur Überprüfung herangezogen (Bold & Fleischer 2018). Die Anforderung an die Toleranz der Elektrodendicke liegt im Bereich $\pm 1 \mu\text{m}$ (Haselrieder 2016). Die gemessene Elektrodendicke resultiert aus der Kalanderspalthöhe, die mit der Relaxation des Materials addiert wird. Die Relaxation, die die Rückfederung der Beschichtung beschreibt, hängt unter anderem von den Binder-Leitruß-Agglomeraten ab (Haselrieder 2016). Die Ergebnisse einer Simulation der Verdichtung von Kathoden aus (Sangrós Giménez & Schilde et al. 2020) zeigen die Auswirkung der Relaxation auf die Beschichtungsporosität im Kalandriervorgang. Eine Kathode weist dabei beispielsweise eine Porosität von 20 % im Verhältnis zur Ausgangsporosität auf. Die Relaxation führt zu einer Erhöhung des Wertes auf 38 % unmittelbar nach dem Verlassen des Kalanderspalts. Nicht einbezogen sind dabei zusätzliche Effekte und Einflüsse, die durch den Binderanteil, die Standzeiten oder einen Temperaturwechsel verursacht werden.

2.3.2 Veränderungen der mechanischen Eigenschaften

Die Elektrodendicke, als entscheidender Qualitätsparameter zur Beurteilung des Kalandrierprozesses, ist nur eine von mehreren sich beeinflussenden Material- und Prozessgrößen, die in Abbildung 2-12 aufgelistet sind. Festgehalten sind die Materialparameter der unkalandrierten Elektrode, die durch die Kalandrierparameter bearbeitet werden und in den Materialausgangsgrößen der kalandrierten Elektrode enden. Eine Eingangsgröße ist das Flächengewicht der unkalandrierten Beschichtung. Die zu erzielende Dichte wird mit dem Flächengewicht verrechnet über die Zieldicke nach dem Kalandrierprozess vorgegeben wird. Eine Verdichtung führt zu einer Verdrängung des Materials (Fritz & Schulze 2012), sodass eine hohe Verdichtung auch eine messbare Verringerung des Flächengewichts zur Folge haben kann.

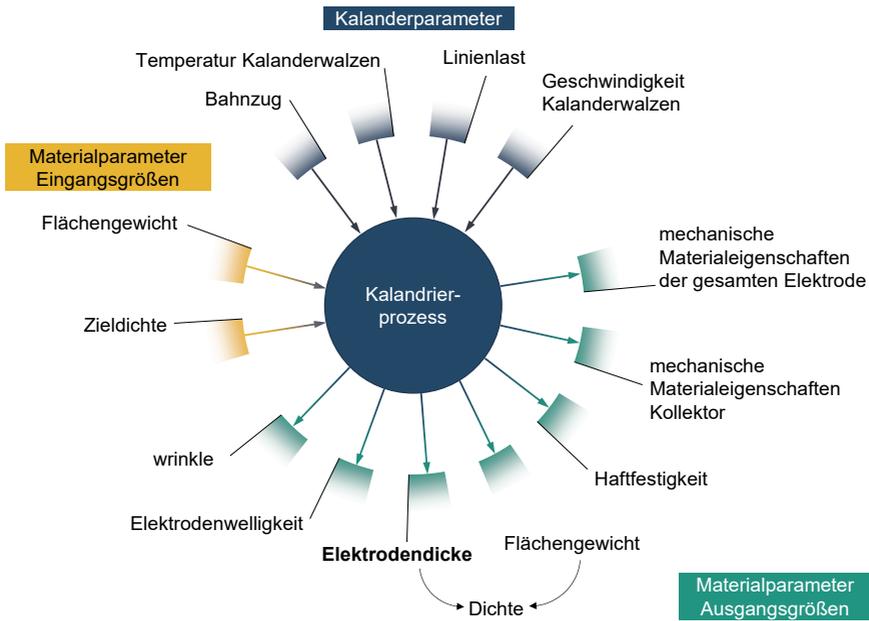


Abbildung 2-12: Prozess- und Materialgrößen für das Kalandrieren im Überblick

Neben dem Flächengewicht ist die Elektrodendicke zur Bestimmung der erreichten Dichte erforderlich. Damit gekoppelt ist der Verdichtungsgrad Π_E der Elektroden in Formel 2-2, der über das Verhältnis aus Eingangs- und Ausgangsdicke berechnet ist (Hasselrieder 2016).

$$\Pi_E = 1 - \frac{d_{kal}}{d_{unkal}}$$

Π_E : Verdichtungsgrad 2-2

d_{unkal} : Elektrodendicke unkalandriert

d_{kal} : Elektrodendicke kalandriert

Eine Erhöhung des Verdichtungsgrads erzwingt eine Erhöhung der Linienlast. Die Linienlast stellt einen Prozessparameter dar. Weitere Kalandrierparameter sind die Geschwindigkeit, der Bahnzug und die Temperatur der Kalandrierwalzen. Die Linienlast beschreibt die notwendige Kraft bezogen auf die Beschichtungsbreite, die zum Erreichen

der Zieldichte erforderlich ist. Die Linienlast resultiert aus dem mechanischen Widerstand, den die Elektrode beim Verdichten bietet. Der mechanische Widerstand ist von der Materialzusammensetzung abhängig. Auch das Aktivmaterial spielt dabei eine entscheidende Rolle. (Meyer & Bockholt et al. 2017) zeigen auf, dass die notwendigen Linienlasten für eine Kathode mehr als doppelt so hoch wie die für eine Anode, siehe Abbildung 2-13. Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien benötigen im Allgemeinen eine hohe Dichte, da diese stark an die Energiedichte einer Batteriezelle gekoppelt ist (Kim & Lee et al. 2018). Eine hohe Dichte erfordert hohe Linienlasten. Die notwendige Linienlast ist geschwindigkeitsabhängig, da die Wirkzeit der Kraft mit der Geschwindigkeit korreliert. Aus diesem Grund zeigen die Ergebnisse in Abbildung 2-13 leicht erhöhte Linienlasten für hohe Geschwindigkeiten, aber auch eine höhere Varianz.

(Lee & Jeon 2014) erklären die Unterschiede in der Kalandrierung von Anode zu Kathode über die Partikelmorphologie. Kathodenpartikel, vor allem Li-NMC-Partikel, sind sphärisch und behalten aufgrund der keramischen Materialeigenschaften ihre Form bei. Bei Anodenpartikeln, vor allem Graphitpartikeln, gibt die Struktur aufgrund der Gleitebenen nach und es kommt zu einer Neuorientierung der Partikel. (Gnanaraj & Cohen et al. 2001) beobachten die Eigenschaften ebenso für Li-CO-Kathoden.

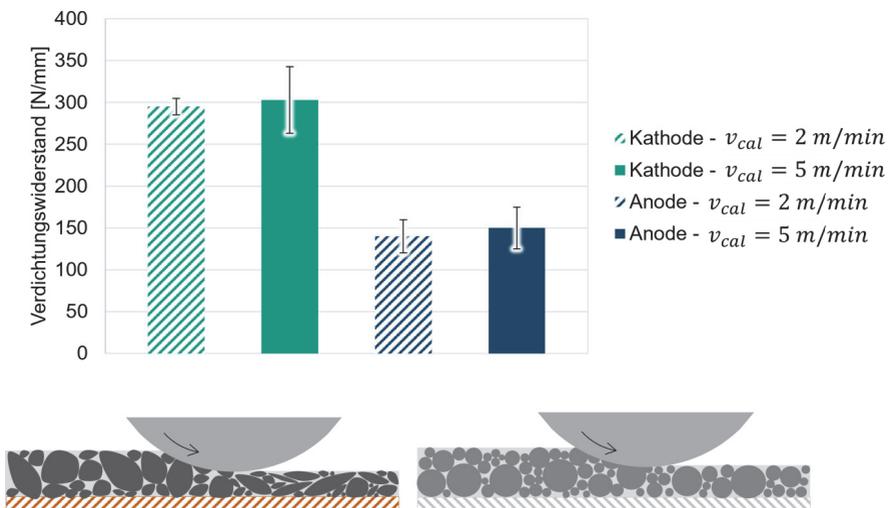


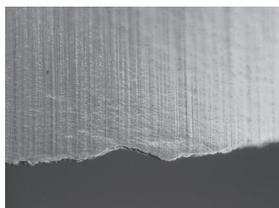
Abbildung 2-13: Notwendige Linienlasten für Anode und Kathode
(in Anlehnung an (Meyer & Bockholt et al. 2017))

Das Kalandrieren von Anodenmaterial ist aufgrund der hohen Präzisionsanforderung herausfordernd. Wie in (Gnanaraj & Cohen et al. 2001) beschrieben, wird vor allem bei Anoden mit synthetischen Graphitflakes beobachtet, dass sich diese unter Druck parallel zum Ableiter ausrichten und dabei die Lücken zwischen den Partikeln schließen. Geschlossene Poren verhindern das Eindringen von Elektrolyt, wodurch inaktive Bereiche entstehen. Zusätzlich muss die Oberfläche für die SEI-Bildung genügend offene Strukturen bieten. Ein zu hoher Kalandrierdruck kann zur Beschädigung der Aktivmaterialpartikel führen, sodass Einbußen der elektrochemischen Eigenschaften die Folge sind. (Gnanaraj & Cohen et al. 2001) zeigen zudem auf, dass das Verdichten von Graphit präzise und mit geringer Last durchgeführt werden muss.

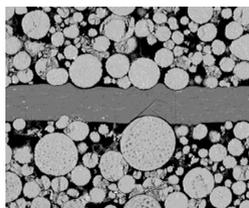
Entscheidend für das Kalandrierergebnis sind nicht nur die Aktivmaterialpartikel, sondern auch der Binder. Der Binder bestimmt unter anderem das Verdichtungsverhalten der Elektroden. Entscheidend ist die Anzahl an Kontaktflächen von Binder zu den Aktivmaterialpartikeln sowie der Binderanteil selbst (Meyer & Weyhe et al. 2020). Der Prozessparameter Kalendarwalzentemperatur steht im Zusammenhang zum Bindernetzwerk, da mit einer hohen Kalendarwalzentemperatur die Fließfähigkeit des Binders verbessert wird. Folglich ist eine geringere Linienlast zur Verdichtung notwendig. Nachteilig wirkt sich die höhere Kalendarwalzentemperatur durch eine stärkere Verdrängung der Beschichtung auf der Metallfolie aus. Auswirkungen sind eine Wellen- oder Winkle-Bildung, die in Kapitel 3.3 beschrieben werden. Die Verdrängung der Beschichtung auf der Kollektorfolie tritt grundsätzlich bei jedem Kalandriervorgang auf. Die Stärke der Verdrängung ist unter anderem von der Kalendarwalzentemperatur, der Linienlast und dem Bindergefüge abhängig.

Der Binder hat zusätzlich einen Einfluss auf das Haftungsverhalten der Elektrode. In (Meyer & Weyhe et al. 2020) erfolgen Untersuchungen mit variierendem Binderanteil. Ein geringer Feststoffanteil an Aktivmaterialpartikeln sowie ein hoher Binderanteil führen zu einer besseren Haftung. Grund dafür ist die mit dem steigenden Binderanteil größer benetzte Oberfläche der Aktivmaterialpartikel und damit einem steigenden Anteil an Kontaktstellen zwischen dem Bindernetzwerk und den Aktivmaterialpartikeln. Mit steigendem Anteil an Binder und Leitruß steigt dennoch auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich Agglomerate aus Binder und Leitruß in den Hohlräumen zwischen den Aktivmaterialpartikeln bilden. Agglomerate stellen Schwachstellen in der Beschichtung und somit eine potenzielle Ursache der Delamination dar. Grund dafür sind die während des Verdichtungsprozesses auftretenden Schubspannungen (Bockholt & Haselrieder et al.

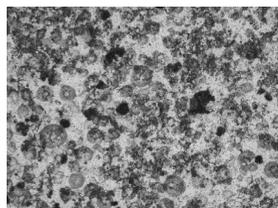
2013). Die Haftung wird in ein Adhäsionsverhalten und in ein Kohäsionsverhalten, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, unterteilt. Die Adhäsion erfolgt über eine gute Vernetzung der Beschichtungspaste mit dem Stromsammler und wird durch die Verankerung der Kathodenpartikel in die Aluminiumfolie gestärkt. Die Kohäsion wird über eine gute Verteilung des Binders und über eine ausreichende Ausbildung eines Bindernetzwerks sichergestellt. Im Allgemeinen hat das Kalandrieren eine positive Auswirkung auf die Haftfestigkeit zwischen der Beschichtung und der Ableiterfolie. Die mechanische Bindung zwischen den Aktivmaterialpartikeln und dem Stromsammler führen zusätzlich zu einer Steigerung der Haftkraft und einer Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit. Abbildung 2-14 zeigt den Querschnitt einer kalandrierten Elektrode sowie die Aufnahmen einer Folienoberfläche nach dem Entfernen der kalandrierten Beschichtung. Eine Aluminiumfolie vor dem Kalandrieren zeigt allein Verarbeitungsmerkmale aus dem Folienherstellungsprozess. Hingegen sind nach dem Kalandrieren Eindrücke der Aktivmaterialpartikel in dem Kollektor zu erkennen. Die einzelnen Eindrücke haben Tiefen von $3\ \mu\text{m}$ bis $5\ \mu\text{m}$. Auf die damit verbundene globale plastische Deformation der Trägerfolie wird erneut in Kapitel 3.3 eingegangen.



Aluminiumfolie vor dem Kalandrieren



kalandrierte Elektrode im Querschnitt



Aluminiumfolie nach dem Kalandrieren

Abbildung 2-14: Einfluss des Kalandrierens von Li-NMC-Partikeln auf eine $15\ \mu\text{m}$ dicke Aluminiumfolie

Neben der Haftfestigkeit werden auch andere mechanische Materialeigenschaften der Beschichtung und des Kollektors durch den Verdichtungsprozess verändert. Die mechanischen Eigenschaften sind für die Handhabung der Elektroden in den nachfolgenden Prozessschritten von Relevanz. Untersuchungen aus (Zhang & Xu et al. 2017) zeigen, dass eine kalandrierte Kathode im Vergleich zu einer kalandrierten Anode ein geringeres Elastizitätsmodul und eine geringere Streckgrenze wie auch eine höhere Bruchdehnung aufweist. Damit weist die Kathode ein sprödes Verhalten auf, was zu

größeren Herausforderungen bei der Handhabung führt. Ein sprödes Materialverhalten für Elektroden äußert sich im Abplatzen der Beschichtung von der Kollektorfolie. Im Vergleich zu Anoden ist die mechanische Beanspruchung für Kathodenmaterialien im Kalandrierprozess stärker. Aus diesem Grund liegt der Fokus ab Kapitel 3.2 auf Kathodenmaterialien. Eigene Zugversuche, durchgeführt in (A_Bernecker 2021), verdeutlichen die Zustandsänderung der mechanischen Eigenschaften zwischen einer unkalandrierten und einer kalandrierten Elektrode. Die Ergebnisse der Zugversuche in Abbildung 2-15 zeigen, dass der Verbund aus Kollektor und Beschichtung im unkalandrierten Zustand ein höheres Elastizitätsmodul im Vergleich zur unbeschichteten Aluminiumfolie aufweist. Grund dafür ist, dass das aufgetragene Material die Zugkraft erhöht. Weiterhin ist eine Steigerung des Elastizitätsmoduls im kalandrierten Zustand zu erkennen. Des Weiteren weisen die kalandrierten Proben eine Verringerung der Bruchdehnung auf. Verallgemeinert heißt das, dass das Verdichten den Verbund steifer und spröder macht. Diese Eigenschaftsänderung führt zu Herausforderungen in den nachfolgenden Prozessschritten. Die Dicke der Kollektorfolie und die Zusammensetzung der Beschichtung aus Anteilen von Aktivmaterial und Binder sorgen für die Differenzen der Ergebnisse in Abbildung 2-15.

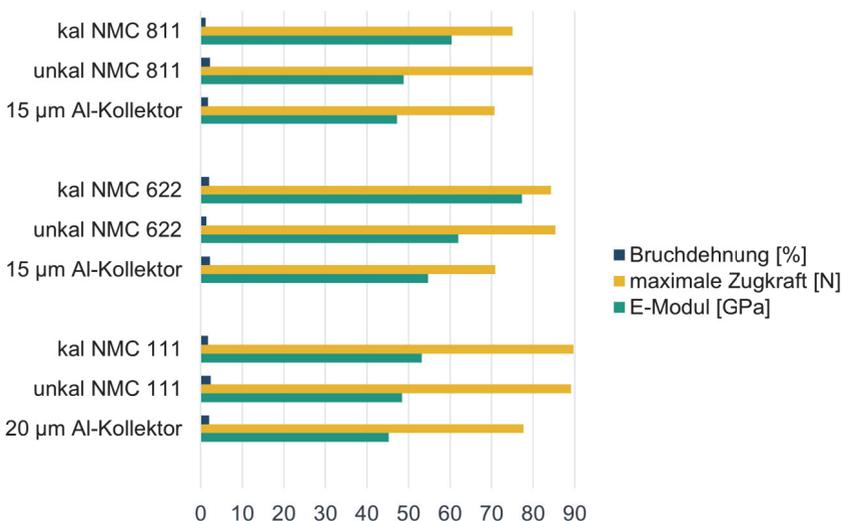


Abbildung 2-15: Zugversuche an Kathodenmaterialien für unterschiedliche Zustände (aus (A_Bernecker 2021))

Gestützt werden die Ergebnisse durch (Zheng & Tan et al. 2012), dargestellt in Abbildung 2-16. Die Bruchspannung steigt mit stärkerer Komprimierung bei gleichzeitiger Erhöhung des Elastizitätsmoduls. (Zheng & Tan et al. 2012) beschreiben, dass damit die Festigkeit des Laminats erhöht wird, jedoch das Material auch spröder ist. Eine hohe Bruchspannung zeigt eine starke mechanische Bindung zwischen den Aktivmaterialpartikeln. Das Ansteigen des Elastizitätsmoduls ist jedoch in der Zellanwendung von Nachteil. Die Beschichtung erfährt durch die Interkalation von Lithium-Ionen eine mechanische Ausdehnung und Schrumpfung. Die damit eingebrachten mechanischen Eigenspannungen in die Beschichtung bringen das Risiko einer Rissentstehung und Ausbreitung mit sich. Je höher das Elastizitätsmodul, desto stärker bilden sich Eigenspannungen durch die Einlagerung aus. Unter Beachtung der Zieldichte ist mit Sicht auf die mechanischen Eigenschaften für eine Kalandrierung daher ein Kompromiss zwischen einer hohen Bruchspannung und einem niedrigen Elastizitätsmodul zu finden.

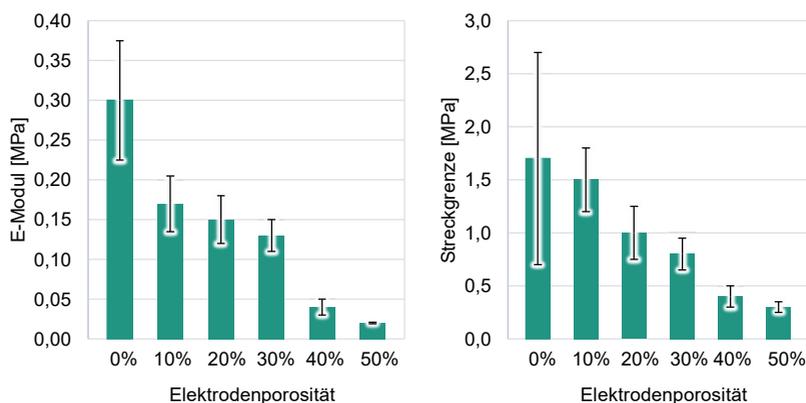


Abbildung 2-16: Zugversuche an einer NMC 111-Kathode für unterschiedliche Porosität (aus (Zheng & Tan et al. 2012))

In (Shim & Striebel 2003) wird erwähnt, dass das Kalandrieren ein Optimum zwischen Komprimieren, elektrischer Leitfähigkeit und Kapazität darstellt und es keinen linearen Zusammenhang zwischen der Verdichtung und der Batteriezellkapazität gibt. Insgesamt führt das Kalandrieren zusammenfassend mit den optimalen Parametern zu einer höheren Zyklenstabilität für Batteriezellen, einer besseren Haftung und einer verbesserten elektrischen Leitfähigkeit für die Elektroden (Du & Dunlap et al. 2014).

3 Stand der Forschung und Technik des Kalandrierens

3.1 Beschreibung von Walzvorgängen

Das Kalandrieren ist, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ein Walzvorgang zur Bearbeitung der Elektrodendichte. In Kapitel 2.3 wird deutlich, dass beim Kalandrieren von Kathodenmaterial hohe Prozesskräfte erforderlich sind, um eine hohe Materialdichte zu erzielen. Notwendig sind dabei Kräfte, um die Aktivmaterialpartikel aneinander vorbeizuschieben und den Hohlraum zu minimieren. Die hohen notwendigen Kräfte zum Erreichen der Zieldichte können jedoch nicht über eine vertikale Flächenpressung, sondern nur über eine Rollenpressung erreicht werden (Kaiser & Wenzel et al. 2014). Die dabei auf das Material wirkende Last wird aufgrund des Linienkontakts zwischen zwei Walzen nicht als flächenbezogener Druck, sondern als Linienlast angegeben. Die im Folgenden beschriebenen Grundlagen betrachten das Walzen eines Materials mit homogenen Eigenschaften im Querschnitt. Die Elektrode ist ein Materialverbund aus der doppelseitigen Beschichtung und der Kollektorfolie. Dementsprechend hat die Elektrode über den Querschnitt inhomogene Materialeigenschaften. Der Unterschied muss bei der Übertragung der Walzgrundlagen auf die Elektrode beachtet werden. Zudem erfolgten hierbei die Einschränkungen, dass es sich um ein Walzenwerk mit einer Verdichtungsstufe und somit einem Walzenpaar handelt. Zusätzlich besitzen die Kalanderwalzen dieselbe Umfangsgeschwindigkeit, sodass Scherkräfte aufgrund unterschiedlicher Drehzahlen verhindert werden. Die folgenden Betrachtungen erfolgen im Querschnitt des Walzenspalts. Einflüsse, wie die Temperatur der Kalanderwalzen oder der Angriffspunkt der erforderlichen Kräfte, werden in den nachfolgenden Kapiteln behandelt.

Der Walzenspalt beginnt gemäß Abbildung 3-1 mit einer Eintrittsebene. Darauf folgt die Rückstauzone, gefolgt von der Haftzone. Der sich öffnende Spalt wird weiterhin als Voreilzone bezeichnet und endet mit der Austrittsebene. In der Rückstauzone ist die Geschwindigkeit des Walzguts kleiner der Walzgeschwindigkeit, orientiert an der Walzdrehzahl. Das Walzgut erfährt in der Haftzone die Geschwindigkeit der Walzen. In der Voreilzone ist das Walzgut schneller als die Walzgeschwindigkeit. Abbildung 3-1 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung an der Ein- und Austrittsebene im Querschnitt. An der Eintrittsebene wird die Oberfläche des Walzguts von den Walzen in den Walzenspalt gezogen und dabei beschleunigt. An der Austrittsebene weist das Walzgut in der Mitte eine erhöhte Geschwindigkeit aufgrund der beschleunigenden Wirkung der verdichtenden Walzkräfte auf. Die Ebene, in der die Geschwindigkeit des Walzguts der Umfangsgeschwindigkeit der Walzen entspricht, wird Fließebene genannt (Fritz & Schulze 2012). Für den Walzenspalt gilt insgesamt die Massenerhaltung.

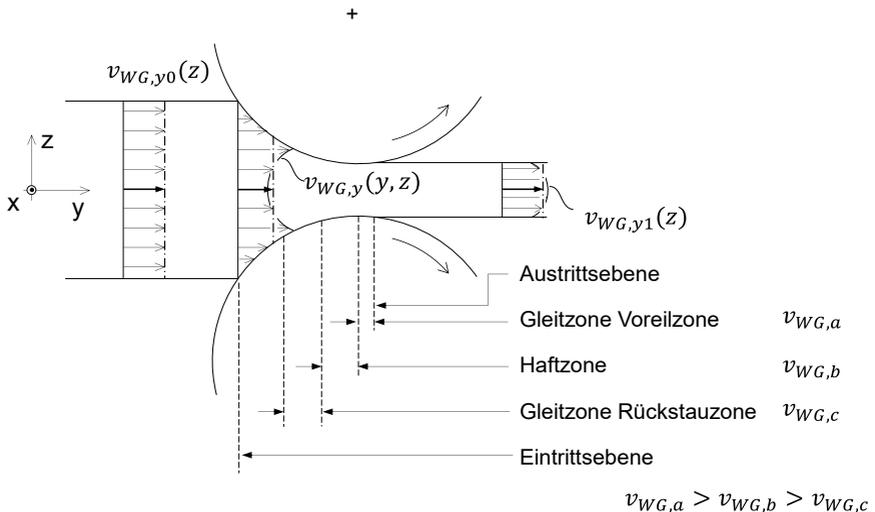


Abbildung 3-1: Geometrische Beschreibung des Walzenspalts
(in Anlehnung an (Overhagen 2018) und (Fritz & Schulze 2012))

Das Walzen ist ein Reibschluss zwischen den Kalandrierwalzen und dem Walzgut. Dementsprechend gilt für das Einziehen des Walzguts in den Walzenspalt nach Abbildung 3-2 die Bedingung $\mu F_N \cos \alpha_0 > F_N \sin \alpha_0$. Die dargestellten Druckspannungen im Material ergeben sich aus der Fließspannung des Walzguts und werden zusätzlich mit der Spannung überlagert, die durch die Reibung eingebracht wird (Fritz & Schulze 2012). k_f entspricht der Fließspannung, k_w dem Umformwiderstand und $k_{w,max}$ dem maximalen Umformwiderstand. Die auf das Aktivmaterial wirkende resultierende Beanspruchung ergibt sich aus einer verdichtenden Kraft und einer Scherkraft während de, Verdichtungsvorgang. Wichtig anzumerken ist, dass die Darstellung einen Walzvorgang ohne Materialförderung zeigt. Überlagernde Zugkräfte werden hierbei nicht betrachtet. Nichtsdestotrotz lässt sich die beim Kalandrieren angegebene Linienlast mit dem maximalen Umformwiderstand gleichsetzen.

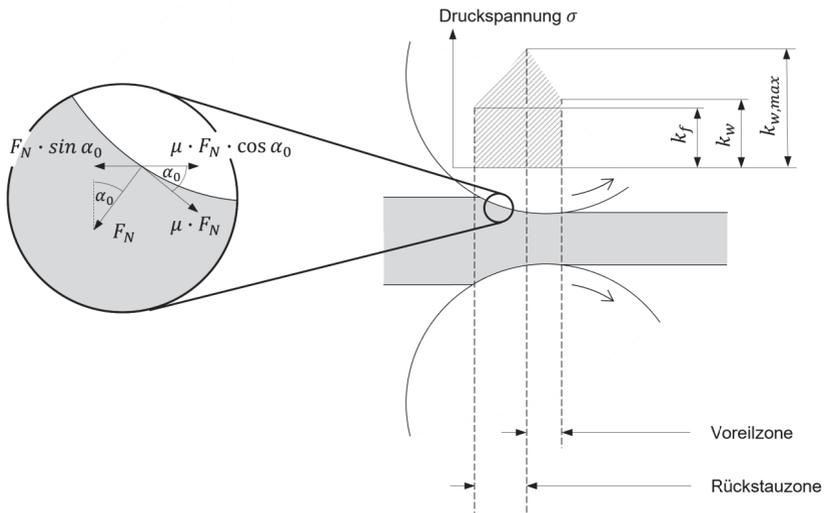


Abbildung 3-2: Kräfteverhältnisse im Walzenspalt
(in Anlehnung an (Overhagen 2018) und (Fritz & Schulze 2012))

Für das Kalandrieren von Elektroden sind ebenfalls die Grundlagen des Walzens gültig. Im Unterschied zur obigen Beschreibung ist jedoch zu beachten, dass es sich bei Elektroden um ein inhomogenes Material handelt. Im Walzenspalt liegt dabei der Kollektor aus homogenem Vollmaterial zwischen zwei Beschichtungen mit einer porösen Struktur. Der Umformwiderstand der Elektrode ergibt sich hauptsächlich aus dem Widerstand des Vorbeigleitens der Aktivmaterialpartikel zueinander. Der Binder, der für den Zusammenhalt der Beschichtung sorgt, ist maßgeblich für die erforderliche Kraft. Die Scherbeanspruchungen im Walzenspalt werden vor allem auf die Beschichtung übertragen. Durch den Walzvorgang kommt es zu einer Relativbewegung zwischen der Beschichtungsoberfläche und dem Kollektor. Des Weiteren erfolgt im Unterschied zu den dargestellten Zuständen im Walzenspalt aus Abbildung 3-2 ein aktives Herausziehen der Elektrode und somit eine Überlagerung von Zugkräften.

3.2 Stand der Technik des Kalandrierens von Batterieelektroden

Es erfolgt eine Beschreibung des Kalanders, der in dieser Arbeit verwendet wird. Das benutzte Glättwerk des Unternehmens Saueressig mit der Bezeichnung Großkalander 500 MS, dargestellt in Abbildung 3-3, kann bei der zugelassenen Wirkbreite für Elektrodenbeschichtungen von 350 mm eine Linienlast von 2000 N/mm aufbringen. Die Verdichtung der Elektroden ist dabei spaltgeregelt, sodass der Walzenspalt auf einen vorgegebenen festen Wert gesteuert wird. Die Walzen können mit einer Temperatur bis 90°C erhitzt werden. Das Erwärmen der Kalanderwalzen erfolgt in der Regel unter Verwendung von Wasser oder Thermalöl. Eine erhöhte Kalanderwalzentemperatur führt zu einer Verringerung der notwendigen Walzkräfte, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Weitere wichtige Anlagenparameter sind die Fördergeschwindigkeit im Bereich von 1 m/min bis zu 30 m/min sowie der Bahnzug. Der Bahnzug ist die beim Fördern wirkende Kraft bezogen auf die Elektrodenbreite. Die Kraft kann an drei Stellen an der Anlage eingestellt werden. Die erste wirkende Kraft ist die Bremskraft zu Beginn der Linie beim Abwickeln des Materials. Die zweite Zugkraft wirkt unmittelbar hinter dem Kalanderspalt und die dritte Zugkraft beim Aufwickeln des Materials. In der Anlage verbaut sind zusätzlich eine Bahnreinigung vor der Verdichtung sowie eine integrierte Dickenmessung, die die Elektrodendicke nach dem Lasertriangulationsprinzip erfasst.



Abbildung 3-3: Großkalander

Die wichtigste Prozessgröße für das Kalandrieren ist der Walzenspalt. Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, wird die Einstellung des Walzenspalts über die Elektrodendicke mit einer Anforderung von $\pm 1 \mu\text{m}$ überprüft. Leider kann der Regelkreis zwischen Walzenspalt und Materialdicke nach derzeitigem Stand der Technik nicht geschlossen werden, da die Inline-Messtechnik mit der erforderlichen Messmittelfähigkeit noch nicht entwickelt ist. Für eine Inline-Dickenmessung sind berührungslose Messsysteme eine Festanforderung. Derzeitige Anwendungen beinhalten optische und kapazitive Sensoren. Optische Systeme nach dem Lasertriangulationsprinzip haben aber die Schwierigkeit, dass die Oberfläche der Elektrode nach dem Kalandrieren spiegelt und sich unter Umständen wellt. Der Laserstrahl einer Triangulationsmessung wird abgelenkt, sodass die Messwerte dadurch verfälscht oder nicht auswertbar sind. Kapazitive Sensoren stellen eine Alternative dar, um die geforderte Genauigkeit zu erreichen. Allerdings besitzen diese Sensoren bei einer Auflösung $< 1 \mu\text{m}$ nur einen Arbeitsbereich von $> 1 \mu\text{m}$. Sowohl wellige Elektroden als auch die Bewegung der Elektrodenbahn in der laufenden Produktion könnten den konstanten Abstand von $< 1 \text{mm}$ zum Sensor nicht halten. Folglich gibt es keine fähige Inline-Dickenmessung. Produktionsbegleitend erfolgt die Qualitätssicherung zur Dickenüberprüfung über taktile Messuhren. Es werden Elektrodenproben der Linie entnommen und mit Messuhren vermessen.

Die größte anlagenseitige Herausforderung beim Kalandrieren ist folglich die erforderliche Präzision der Materialdicke bei gleichzeitigem Wirken von hohen Linienlasten zu erreichen (Schlick & Hertel et al. 2011). Eine Störgröße bei der Überprüfung der Materialdicke ist die Relaxation der Elektroden. Die Relaxation beschreibt den Effekt der

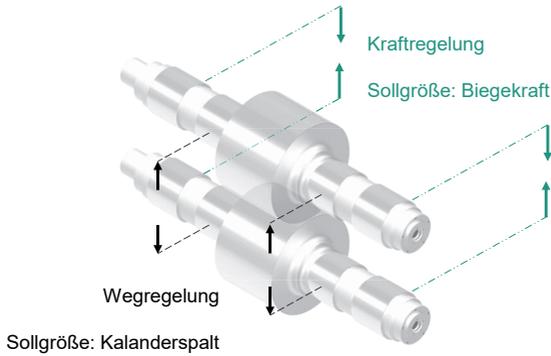
Rückfederung des Beschichtungsmaterials nach dem Kalandriervorgang. Dabei werden die elastischen Anteile der eingebrachten Spannungen in der Beschichtung frei und sorgen für eine Dickenzunahme. Die Relaxation setzt bereits unmittelbar nachdem die Elektrode den Kalenderspalt verlässt ein. Dadurch stimmt der Elektrodendickenwert nicht mit dem Wert des Walzenspalts überein.

Die Walzenbiegung hat einen weiteren Einfluss auf die resultierende Elektrodendicke. Die an den Kalandrierwalzen wirkenden hohen Hydraulikkräfte sorgen für eine Verformung der Kalandrierwalzen (Ostermann 2014). Wie in Abbildung 3-4 dargestellt, wirken links und rechts der Wirkfläche Hydraulikzylinder zur Einstellung des Kalenderspalts. Da die Zylinder weggeregelt sind, stellen diese in einem Kräftegleichgewicht Fixpositionen dar. An den äußeren Lagersitzen greifen die Hydraulikkräfte zum Zusammenziehen der Walzen an. In der Mitte wirkt entgegengesetzt die Linienlast zur Verdichtung der Elektrode. Durch das Kräftegleichgewicht entsteht somit eine Walzenbiegung um die Lagersitze der Stellzylinder. Dadurch ergibt sich quer zur Bearbeitungsrichtung ein inhomogener Walzenspalt für einen zylindrischen Schliff, dargestellt in Abbildung 3-4, dessen Profil sich auf die Elektrodendicke überträgt.

Die Walzenbiegung kann durch verschiedene Maßnahmen verringert werden (Röthemeyer & Sommer 2013). Eine Möglichkeit ist ein Walzenschliff, eine sogenannte Bombage, mit einer konvexen Form für den Wellenabsatz der Kalandrierwalze, der die Last auf die Elektrode überträgt. Dieser Wellenabsatz wird im Folgenden als Ballen bezeichnet. Der Durchmesser in der Ballenmitte ist im entspannten Zustand geringfügig größer als der Durchmesser am Ballenende, siehe Abbildung 3-4. Bei anliegenden Hydraulikkräften weist der Walzenspalt somit eine homogene Lücke auf. Die Ausführung der Bombage hängt von der zu kalandrierenden Materialbreite sowie der dazu notwendigen Linienlast ab. Je höher die Elektrodenbreite und je höher die erforderliche Linienlast, umso ausgeprägter muss die Bombage gewählt werden.

(Hackfort & Wolters et al. 2011) beschreiben ergänzend die Möglichkeit, die Hydraulikkräfte in den Kraft- wie auch Stellzylinder anzupassen, um den Arbeitsbereich für unterschiedliche Materialbreiten und Linienlasten mit einer Bombage zu ermöglichen. Die äußeren kraftaufbringenden Zylinder werden als Roll-Bending-Zylinder bezeichnet. Der Kalandrierer besitzt eine Kalandrierwalze mit einem zylindrischen Schliff der Wirkfläche. Zusätzlich ist das System von (Hackfort & Wolters et al. 2011) verbaut, bei dem über die äußeren Roll-Bending-Zylinder der Walzenspalt für die ausgelegte Elektrodenbreite von 350 mm homogen bleibt.

Eine Alternative zur Einstellung der Bombage bieten (Gulde 2015) und (Matsumura & Tada et al. 2014) über eine thermische Bombage, bei der über eine segmentierte induktive Erwärmung oder einen gesteuerten Fluss einer erwärmten Flüssigkeit über Bohrungen in der Kalendarwalze die Ausdehnung des Walzenmantels in Segmenten gesteuert werden kann.



	Zylindrischer Ballenkörper	Bombage
Biegekraft nicht aktiv		
	Spaltform	Spaltform
Biegekraft aktiv		
	Spaltform	Spaltform

Spaltregelung: Position fix Mittelachse Kalendarwalze Biegeachse Kalendarwalze

Abbildung 3-4: Kalendarwalzenbiegung mit und ohne Bombage

3.3 Elektrodendefekte und deren qualitative Ursachen

Die in Kapitel 3.2 erwähnte Bombage ist eine Ursache für Fertigungsfehler beim Kalandrieren. Abbildung 3-5 links zeigt nach (Ostermann 2014) die Auswirkung einer nicht angepassten Bombage. Durch den geringeren Walzenspalt in den Randbereichen erfährt das Walzgut in den Außenbereichen eine Längung um ΔL . Die Ausdehnung der Überlänge ΔL ist in der Ebene durch die nicht gelängten Bereiche begrenzt, sodass das Walzgut in die dritte Dimension ausweicht. Dadurch kommt es zur Wellenbildung. Wellen bilden sich generell bei Überschreitung einer Streckungsdifferenz des Walzguts. Grund dafür ist, dass Verdichtung und Kraftwirkung in Teilbereichen zu hoch sind.

In Abbildung 3-5 sind weitere typische Walzfehler mit Wellenbildungen dargestellt (Overhagen 2018). Materialfehler aus dem vorhergehenden Prozess sind dabei nicht berücksichtigt. Die schematische Darstellung in Abbildung 3-5 a zeigt eine Längung der äußeren Bereiche. Dabei zeigen die hellen Bereiche eine Wellenbildung. Verdeutlicht wird der Effekt durch die Skizze links in Abbildung 3-5. Eine höhere Verdichtung in den äußeren Bereichen führt zu einer Längung und zu einer Wellenbildung. Ursachen dafür sind unpassende Bombagen oder eine zu hohe Verdichtung und somit eine Walzenbiegung aufgrund zu hoher Kräfte. Der Elektrodendefekt in Abbildung 3-5 b zeigt den entgegengesetzten Effekt. Die mittige Längung des Walzguts wird durch eine bombierte Walze erzeugt, auf der nicht genügend Kraft wirkt, sodass der Walzenspalt mittig kleiner ist. Die Darstellung in Abbildung 3-5 c enthält eine einseitige Wellenbildung und deutet somit auf eine Schiefstellung der Walzen hin. Die Skizze in Abbildung 3-5 d ist die Kombination aus einer Schiefstellung und der Verarbeitung außerhalb des Betriebsoptimums. Die Ursache für eine Wellenbildung ist nicht zwingend ein inhomogener Walzenspalt oder eine Schiefstellung der Walzen. Inhomogene Beladungen auf der Elektrode stellen für den Kalandrierprozess lokale Schwankungen beim Verdichten dar und sind ebenso eine Ursache für die Elektrodendefekte aus Abbildung 3-5. Laut (Weissenberger & Guth et al. 2014) sind unterschiedliche Beschichtungsstärken der Elektroden in kommerziellen Batteriezellen zu beobachten.

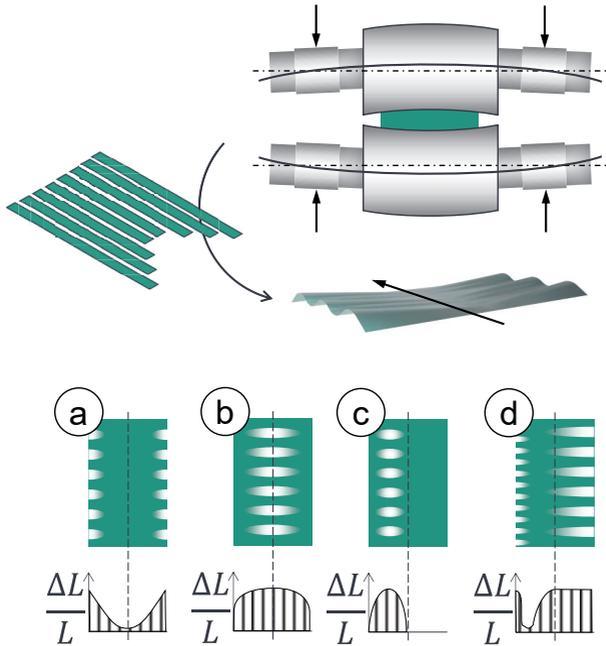


Abbildung 3-5: Walzfehler

(in Anlehnung an (Ostermann 2014) und (Overhagen 2018))

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Beschichtung und der Kollektorfolie im Materialverbund Elektrode sorgen für einen inhomogenen Eigenspannungszustand nach dem Walzen. Die unterschiedlichen Ausdehnungen über den Querschnitt sind in Abbildung 3-6 dargestellt. Die Kollektorfolie erfährt im Unterschied zur Beschichtung eine geringfügigere beziehungsweise keine Verzerrung. Die Dehnung der Beschichtung ist in wie auch quer zur Bearbeitungsrichtung dargestellt.

Der beschichtete Bereich wird in Bearbeitungsrichtung gedehnt, gekennzeichnet in Abbildung 3-6. Der unbeschichtete Bereich behält seine Länge L . Die Dehnung des beschichteten Bereichs um ΔL führt zu Wellenbildung, siehe Abbildung 3-6. Die Größe des Längenunterschieds ΔL hängt vom Verdichtungsgrad, vom Flächengewicht und von der Kollektorfolienstärke ab (Günther & Schreiner et al. 2020). Die Aufnahme in Abbildung 3-6 zeigt, dass der beschichtete Bereich Wellen bildet und der unbeschichtete Bereich straff gespannt ist. Im Allgemeinen sorgt eine höhere Belastung des

Elektrodenmaterials, das heißt eine höhere Linienlast, für eine stärkere Ausprägung der Elektrodendefekte (Günther & Schreiner et al. 2020). Die Linienlast kann, wie in Kapitel 2.3.2 erwähnt, durch eine höhere Kalandrierwalzentemperatur verringert werden. Allerdings beeinflusst die Kalandrierwalzentemperatur das Fließverhalten der Beschichtung, sodass die positive Auswirkung einer reduzierten Längung ΔL verringert wird.

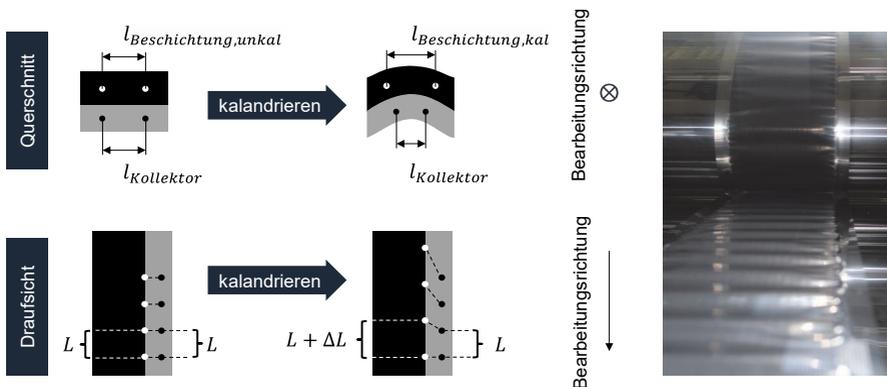


Abbildung 3-6: Wellenbildung bei kalandrierten Elektroden

Die kalandrierte Elektrode wird nach dem Walzenspalt mit der Bahnzugkraft über die gesamte Bahnbreite beaufschlagt. Im Freischnitt in Abbildung 3-7 ist zu erkennen, dass der Elektrode vor und nach dem Kalanderspalt über die gesamte Breite eine Bremsbeziehungsweise Zugkraft überlagert ist. Im Kalanderspalt befindet sich lediglich der beschichtete Bereich im Eingriff. Es wirkt über den Linienkontakt die Verdichtungskraft und aufgrund der Drehbewegung der Kalandrierwalze eine Schubkraft im beschichteten Bereich. Über die Punkte in Weiß und Schwarz in Abbildung 3-7 ist der Längenunterschied nach dem Kalandrieren vom beschichteten zum unbeschichteten Bereich angedeutet. Der resultierende Versatz von den weißen zu der schwarzen Markierung führt im Übergangsbereich zu Faltenbildung. Einen großen Einfluss auf die Falten, die sogenannten „Wrinkles“, hat die Zugkraft, da auf dem unbeschichteten Bereich im Kalanderspalt keine Kraftübertragung der Kalandrierwalze erfolgt und somit ein Voreilen des unbeschichteten Bereichs möglich ist.

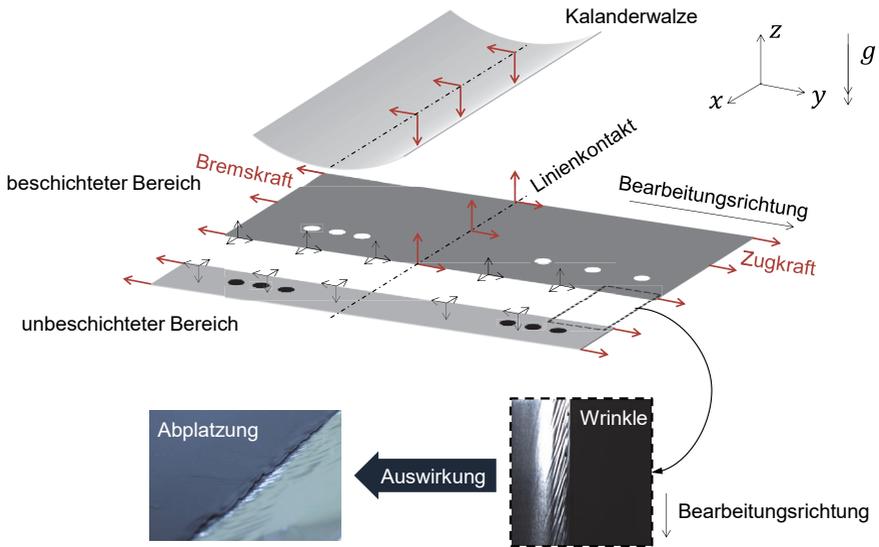


Abbildung 3-7: Freischnitt einer Elektrode mit Wrinkle-Bildung im Kalanderspalt

(Günther & Billot et al. 2016) beschreiben, dass Wrinkles eine negative Auswirkung auf das Fügen der Ableiter haben und es im Randbereich zum Abplatzen des Materials kommen kann. Ein Abplatzen des Materials, wie in Abbildung 3-7 abgebildet, führt zu einem Materialausschuss. Messtechnisch lässt sich das Abplatzen nicht nur optisch feststellen, sondern auch über die Größe Haftkraft messen. Die Haftkraft beschreibt dabei den Zusammenhalt zwischen der Beschichtung und der Metallfolie.

Eine Minimierung des Bahnzugs zur verminderten Ausprägung des Elektrodendefekts Wrinkle steht jedoch im Widerspruch zum hohen notwendigen Bahnzug für die Folienführung an der Anlage. Eine hohe Bahnzugkraft ist notwendig, damit die Elektrode ihre Position über einen Reibschluss an den Umlenkwalzen behält und somit ein Teleskopiefehler beim Aufwickeln der Elektrode vermieden wird. Ein Teleskopiefehler bedeutet, dass am Elektrodenwickel die Lagen nicht exakt übereinanderliegen oder zueinander verrutschen können. In diesem Fall spricht man von einer zu geringen Wickelhärte.

(Schmitt & Diehm et al. 2015) schlagen eine intermittierte Beschichtungsweise als Gegenmaßnahme vor, das bedeutet ein unterbrochenes Beschichtungsbild, wie in Abbildung 3-8 dargestellt.

Eine Intermittierungslücke entspricht einer Entspannungslücke, da die Kalandrierwalzen in der Freistelle nicht im Eingriff mit der Elektrode ist und der Versatz nicht auf die nächste Beschichtungsfläche übertragen werden kann. Die eigene Aufnahme in Abbildung 3-8 zeigt dennoch, dass bei einer hohen Beladung und hohen Zieldichte die Verzerrung ebenso zur Wrinkle-Bildung führen kann. Die Faltenbildung setzt sich von der Beschichtungskante in der Intermittierungslücke fort. Entscheidend ist somit bei dieser Maßnahme den unbeschichteten Randbereich vor dem Kalandrieren wegzuschneiden. Hierbei ist zu beachten, dass für eine beschnittene Elektrode die Dehnung ΔL im beschichteten Bereich nicht über den unbeschichteten Bereich begrenzt wird und eine Materialausdünnung erfolgen kann. Die Reduzierung des Flächengewichts führt daher zu Kapazitätsverlusten. Des Weiteren sind die Beschränkungen des Elektrodenlayouts auf das Batteriezellendesign zu berücksichtigen, siehe Abbildung 2-8.

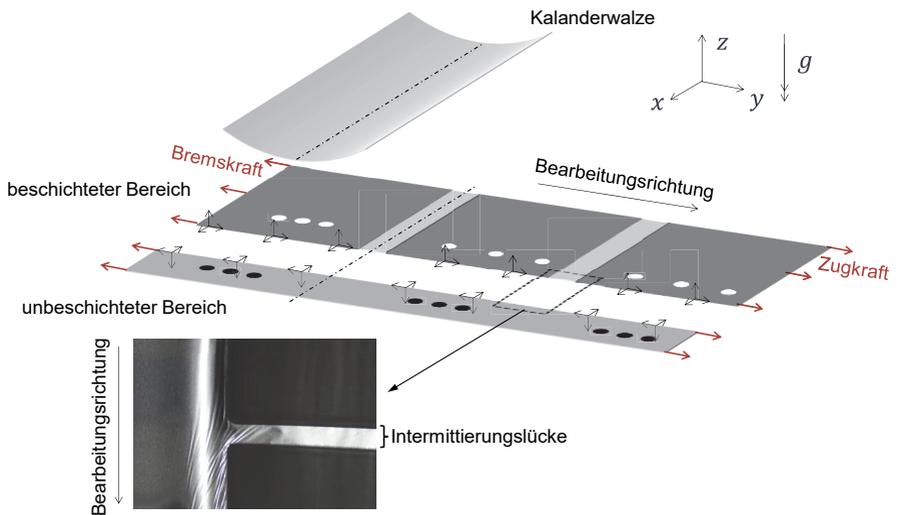


Abbildung 3-8: Freischnitt einer Intermittierungslücke mit Faltenbildung im Kalanderspalt

Wie oben beschrieben, findet nicht nur eine Dehnung der Beschichtung in Bearbeitungsrichtung, sondern auch eine Dehnung quer zur Bearbeitungsrichtung statt. Abbildung 3-9 zeigt eine wellige Elektrode im Querschnitt auf einer Umlenkwalze. Die Überlagerung der Bahnzugkraft führt zu einer Faltenbildung in Bearbeitungsrichtung, die einen kompletten Folienriss verursachen kann. Die Zugkraft führt zu einer Flächenlast von der Elektrode auf den Umfang der Umlenkwalze. Das Heranziehen der Wellen verursacht Querkräfte innerhalb der Elektrode und daraus resultiert eine Faltenbildung. Einen entscheidenden Einfluss hat dabei der Kollektor an sich, denn je dünner die Aluminiumfolie, desto wahrscheinlicher ist ein Bahnriss (Günther & Schreiner et al. 2020).

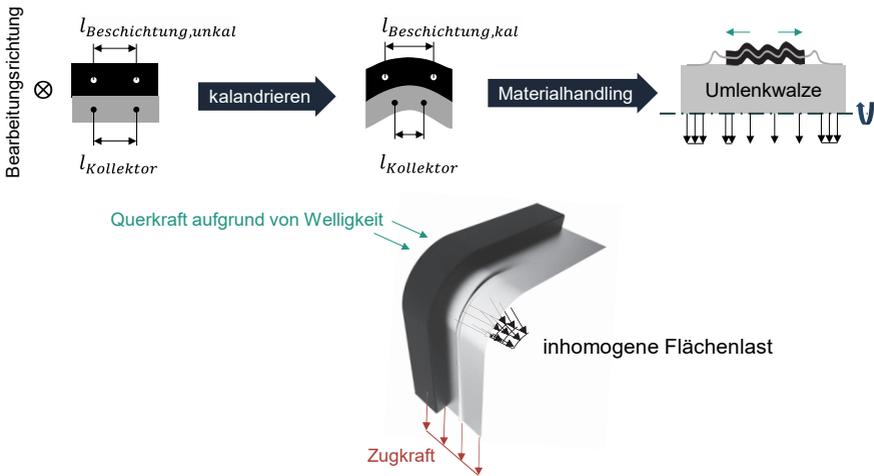


Abbildung 3-9: Faltenbildung an einer Umlenkwalze

Das Slitten einer durchgehend beschichteten Elektrodenfolie nach dem Kalandrieren für die Zellstapelbildung lässt die Eigenspannungen an der Schnittkante frei, sodass sich eine Bogenform bildet, siehe Abbildung 3-10 a). Die Ursache dieses Defektes, dem sogenannten „Camber“-Effekt, liegt darin, dass sich der beschichtete Bereich längt und der unbeschichtete Bereich keine Dehnung erfährt. Dies wirkt sich beim Heraustrennen der Elektrodenblätter und Bilden von Zellstapeln aus, wie in Kapitel 3.4 dargestellt.

Partikelbrüche sind ein weiterer Elektrodendefekt des Kalandrierprozesses, siehe Abbildung 3-10 b). Partikelbrüche lassen sich bei hohen Dichten nicht vermeiden. Es ist materialabhängig, ob ein Partikelbruch aufgrund der größeren Oberflächen zu

besseren Eigenschaften der Elektrode führt oder eine Alterung der Batteriezelle beschleunigt (Daemi & Lu et al. 2019). Zusätzlich kann es beim Kalandrieren zu hohen Dichten zu einer Oberflächenversiegelung kommen (Günther & Schreiner et al. 2020), siehe Abbildung 3-10 c), sodass das Eindringen von Elektrolyt nicht möglich ist und inaktive Bereiche vorhanden sind.

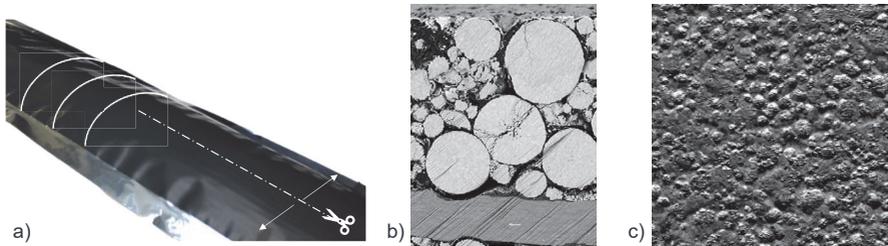


Abbildung 3-10: Weitere Elektrodendefekte

Weitere Defekte in der Elektrode haben ihren Ursprung in den vorhergehenden Prozessschritten, vor allem im Beschichtungsprozess. Beschichtungsfehler wie Fehlstellen oder Ungleichverteilungen der Beschichtung können durch das Kalandrieren zwar gemindert, aber nicht behoben werden (Ketterer & Karl et al. 2009). Hierzu gehören unter anderem inhomogene Beschichtungsdicken, unregelmäßige lokale Beladungen (ribbing), Luftblasen, Randüberhöhungen, Abplatzung der Beschichtung und Agglomerate (Guttoff & Cohen 2006). Wichtig dabei ist, die Defekte vorab zu detektieren und im besten Fall diese Bereiche dann nicht zu kalandrieren. Vor allem Materialanhäufungen haben das Potenzial die Walzen zu beschädigen, da dabei die Last im Walzenspalt kurzzeitig punktuell übertragen wird. Dies gilt es zu vermeiden.

3.4 Wirkzusammenhänge zwischen benachbarten Prozessschritten

In der Elektrodenproduktion entspricht das Produkt eines Prozessschrittes dem Edukt des nachfolgenden Schrittes, sodass, wie in Kapitel 3.3 erwähnt, Elektrodendefekte weitergetragen werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Wirkzusammenhänge der Prozessschritte Mischen der Batteriepaste bis zur Batteriezellstapelbildung zum Prozess Kalandrieren diskutiert.

Die Untersuchungen in (Kim & Jeon et al. 1999) betrachten für das Kathodenmaterial Li-CO die Auswirkungen unterschiedlicher Mischmethoden auf die Verarbeitung und die Batteriezellkapazität. Die Batteriepaste wird dabei auf eine 20 µm dicke Aluminiumfolie mit einem Rakelspalt von 150 µm aufgebracht und bei 140°C für 20 min getrocknet. Anschließend werden die Elektroden mit einer Spalthöhe von 130 µm, bei 100°C und einer Linienlast von 1000 N/mm kalandriert. In Methode 1 wird das Leitadditiv mit einem großen Anteil an Lösungsmittel und Binder vermischt. Darauf folgend wird das Aktivmaterial mit einem hohen Anteil an Lösungsmittel beigefügt, sodass es zu einer hohen Viskosität der Paste kommt. In der zweiten Variante wird die Reihenfolge der Zugabe von Leitadditiv und des Aktivmaterials vertauscht. Bei der dritten Methode wird weniger Lösungsmittel verwendet, da alle Materialien auf einmal vermengt werden, dennoch ist hierbei mit einer unvollständigeren Benetzung zu rechnen. In der vierten Variante erfolgt an erster Stelle ein Trockenmischen des Aktivmaterials mit dem Leitadditiv. Im Anschluss werden der Binder und das Lösungsmittel zugefügt. Insgesamt lässt sich nach (Kim & Jeon et al. 1999) Methode 4 als diejenige Variante festhalten, die zur besten Durchmischung führt und damit in den Vergleichsversuchen die beste Zellperformance aufweist. Die Kalandrierergebnisse sind in Tabelle 3-1 dargestellt. Die Kalandriervorgänge sind kraftgeregelt durchgeführt, somit bei derselben Linienlast (Kim & Jeon et al. 1999). Der Verdichtungsgrad für die Proben aus den Methoden 1 bis 3 zeigen keine erheblichen Unterschiede auf. Lediglich der Verdichtungsgrad für die Methode 4 ist erhöht, sodass bei identischer Linienlast vergleichend zu den Methoden 1 bis 3 eine höhere Elektrodendichte erreicht ist. Das bedeutet, dass die Aktivmaterialpartikel besser aneinander vorbeigleiten. Die Ursache könnte in der besseren Durchmischung und damit verbunden in der besseren Verteilung des Leiterfüßes liegen. Eine weitere mögliche Ursache ist eine geringere Relaxation nach dem Kalandrieren aufgrund der besseren Verteilung des Binders.

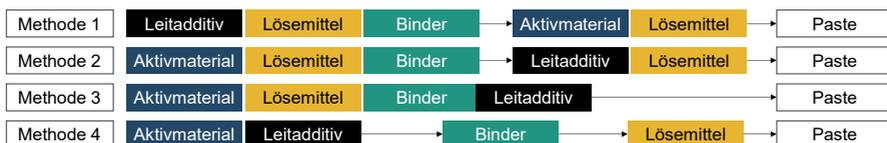


Abbildung 3-11: Mischvariationen (aus (Kim & Jeon et al. 1999))

Tabelle 3-1: Ergebnisse der Mischmethoden (aus (Kim & Jeon et al. 1999))

	Viskosität [cP]	Mischzeit bis stabil [min]	Dicke nach Beschichten [μm]	Dicke nach Kalandrieren [μm]	Verdichtungsgrad [%]
Methode 1	8100	100	121 – 125	97 – 101	19,5
Methode 2	7250	200	124 – 130	100 – 105	18,9
Methode 3	6200	90	121 – 123	97 – 101	18,9
Methode 4	4800	130	118 - 120	92 - 96	21

Einen Einfluss auf die Elektrode hat nicht nur die Reihenfolge der Zugabe der Komponenten im Mischvorgang, sondern auch deren Anteil. In (Marks & Trussler et al. 2011) werden die Zusammenhänge für eine NMC 111-Kathode mit unterschiedlichen Anteilen an Carbon Black als Leitadditiv und PVDF als Binder aufgezeigt, die in einer Knopfzelle verbaut werden. Die Ergebnisse machen deutlich, dass mit einer höheren Linienlast eine höhere Dichte erreicht wird, jedoch mit steigendem Anteil der Bindermatrix aus Binder und Leitadditiv die erreichbare Dichte limitiert wird (Marks & Trussler et al. 2011). Grund dafür ist, dass die Hohlräume sich mit der Bindermatrix füllen und Effekte, wie eine Relaxation, begünstigen. Somit lässt nach (Marks & Trussler et al. 2011) ein Anteil von 3 % an Carbon Black und Binder eine maximale Dichte von $3,2 \text{ g/cm}^3$ zu, wohingegen ein Anteil von 4 % nur eine maximale Dichte von knapp über 3 g/cm^3 ermöglicht.

(Primo & Chouchane et al. 2021) bilden experimentell das Kalandrieren über einen Eindringversuch ab. Hierbei wird ein Eindringkörper von geringer Größe, zum Beispiel ein Zylinder mit einem Durchmesser von 3 mm, in das Material eingedrückt und über die Eindringtiefe die Kraft gemessen. Die Ergebnisse zeigen für eine Kathode mit dem Aktivmaterial NMC 111, je höher der Binderanteil, desto höher ist die aufzubringende Kraft bei gleicher Zielporosität. Des Weiteren besteht über das Entlasten des Eindringkörpers

die Möglichkeit, den Elektrodenaustritt aus dem Kalanderspalt nachzubilden, sodass eventuelle Rückfederungen bewertbar sind. Ein hoher Binderanteil führt zu einem hohen elastischen Anteil und somit zu einer starken Relaxation, wozu (Primo & Chouchane et al. 2021) den Nachweis liefern. Die Forschungsarbeiten zeigen die hohe Relevanz des Binders zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften einer Elektrode. Der Binder bestimmt das Haftungsverhalten, wie auch die Eigenschaften Elastizitätsmodul und Sprödigkeit.

Ein hoher Binderanteil, eine hohe Kalandervalztemperatur und ein großer Walzendurchmesser begünstigen die Haftkraftbedingungen (Schreiner & Oguntke et al. 2019). Durch eine hohe Kalandervalztemperatur verteilen sich die Aktivmaterialpartikel und der Binder gleichmäßiger, was sich günstig auf das Haftungsverhalten auswirkt. Je größer der Walzendurchmesser, desto geringer sind die Scherkräfte und somit die Verschiebung zwischen der Materialoberfläche und dem Stromkollektor. Somit führt ein großer Walzendurchmesser zu besseren Hafteigenschaften.

Die Luftfeuchte, also der Wassergehalt der Umgebung, ist eine wichtige Umgebungsbedingung bei der Herstellung der Kathodenmaterialien. Auch diese hat einen Einfluss auf das Haftungsverhalten der Elektrode. Dies gilt vor allem für Li-NMC-Materialien. Aus diesem Grund ist unter Umständen je nach verwendetem Material eine Nach Trocknung nach dem Kalandrieren sinnvoll, wie (Huttner & Diener et al. 2021) aufzeigen. Durch Restfeuchte kann es zu unerwünschten Nebenreaktionen mit dem Leitsalz LiPF_6 des Elektrolyts kommen. Diese Nebenreaktion führt zur Bildung von gasförmigem Fluorwasserstoff und weiteren Zerfallsprodukten. Der Verlust des Leitsalzes verringert die Leitfähigkeit und erhöht den elektrischen Innenwiderstand der Zelle. Die Bildung von Fluorwasserstoff führt zu einem erhöhten Zellinnendruck und birgt dadurch ein Sicherheitsrisiko. Zusätzlich werden Korrosionsvorgänge der Aktivmaterialien begünstigt, die eine Alterung der Elektrode beschleunigen. Ein hoher Verdichtungsgrad führt aufgrund von Partikelbrüchen zu einer größeren Oberfläche der Aktivmaterialien, sodass der mögliche Feuchteanteil höher ist (Huttner & Diener et al. 2021). Die Ergebnisse der Messung des elektrischen Widerstandes für unterschiedliche Verdichtungsgrade in Abbildung 3-12 zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den kalandrierten und nachgetrockneten Proben auf (Huttner & Diener et al. 2021). Die Haftfestigkeit kann jedoch durch das Nachtrocknen erhöht werden.

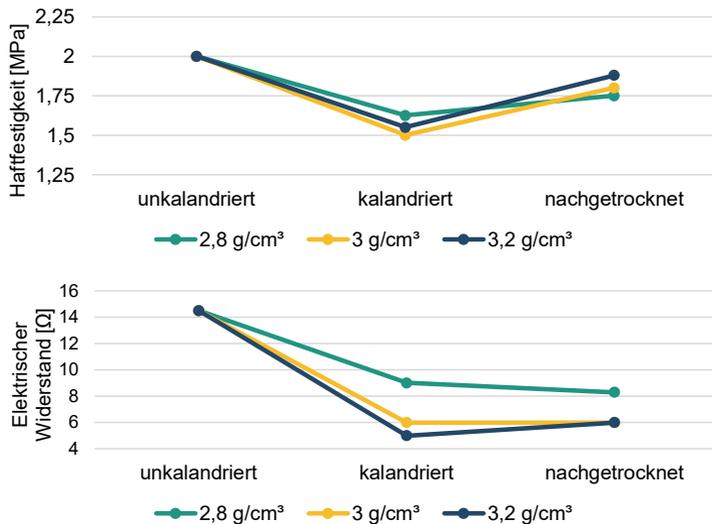


Abbildung 3-12: Einfluss der Feuchte verschiedener Verdichtungsgrade auf die Elektrodeneneigenschaften (in Anlehnung an (Huttner & Diener et al. 2021))

(Primo & Chouchane et al. 2021) bilden den Zusammenhang zwischen dem Kalandrierverhalten der Elektrode und dem Binderanteil experimentell ab. (Haselrieder 2016) beschreibt dies inklusive den Leitrußanteilen modellhaft über eine Gleichung. Die Formel 3-1 nach (Haselrieder 2016) beschreibt die Linienlast q_{Sp} über die Ausgangsdichte $\rho_{B,0}$ und erreichte Dichte $\rho_{B,i}$. Die Amplitude A und die Potenz B sind materialabhängige Parameter, die von der Leitrußmenge und der Menge an Leitrußagglomeraten beeinflusst werden (Haselrieder 2016).

$$q_L = A \cdot (\rho_{B,i} - \rho_{B,0})^B$$

q_L : Linienlast

A : Amplitude

$\rho_{B,i}$: Dichte der kalandrierten Elektrode

$\rho_{B,0}$: Dichte der unkalandrierten Elektrode

B : Potenz

(Meyer 2019) beschreibt ebenso über eine Gleichung das Kalandrieren, jedoch zur Bestimmung der Porosität ε_B für kalandrierte Elektroden, wiedergegeben in Formel 3-2. Dabei entspricht $\varepsilon_{B,0}$ der Anfangsporosität, p einem Proportionalitätsfaktor, q_L der Linienlast, M_B der Massenbeladung und β der sogenannten Massenabhängigkeit. Damit gibt es ein weiteres Modell, das den Zusammenhang vom Kalandrier- zum Beschichtungsprozess darstellt. Die Modelle lassen dennoch keine Vorhersage für veränderte Materialrezepturen zu, da die materialabhängigen Koeffizienten nur nach Durchführung experimenteller Versuchsreihen bestimmen werden können.

$$\varepsilon_B = \varepsilon_{B,0} \cdot p (1 - p) \cdot e^{-\frac{q_L}{\beta \cdot M_B}}$$

ε_B : Porosität der kalandrierten Elektrode

$\varepsilon_{B,0}$: Porosität der unkalandrierten Elektrode

p : Proportionalitätsfaktor

3-2

q_L : Linienlast

β : Massenabhängigkeit

M_B : Massenbeladung

Die auf die Elektrodenfertigung folgende Zellaassemblierung wird ebenso durch die Elektroden Eigenschaften beeinflusst. So zeigen die Untersuchungen in Abbildung 3-13 aus (Mayer & Wurba et al. 2021), dass sich die unterschiedlichen mechanischen Materialeigenschaften von Beschichtung zur Trägerfolie und die damit einhergehende Wellenbildung auf die Zellstapelbildung auswirken. Die Farben des herausgetrennten Elektrodenblatts in Abbildung 3-13 zeigen das Höhenprofil dessen. Hierbei liegt das Elektrodenblatt in der x-y-Ebene für $z = 0$. Exemplarisch sind die Profilverläufe an einer Stelle für zwei unterschiedliche Dichten angegeben. Eine höhere Dichte führt zu einer stärkeren Wellenbildung. Das Elektrodensheet wird im Stapelvorgang über einen Greifer auf dem Stapel positioniert. Das flächige und gleichzeitig präzise Greifen eines welligen Sheets im beschichteten Bereich ist nicht möglich, sodass dabei undefiniert an den Wellenerhöhungen gegriffen wird. Durch das Ablegen auf den Zellstapel werden die Wellen flach gedrückt, wobei der Grad der Verformung des Elektrodensheets nicht kontrollierbar ist. Daher kann eine exakte Kantenausrichtung der Zellsheets auf dem Zellblattstapel nach dem Entfernen des Greifers nicht gewährleistet werden.

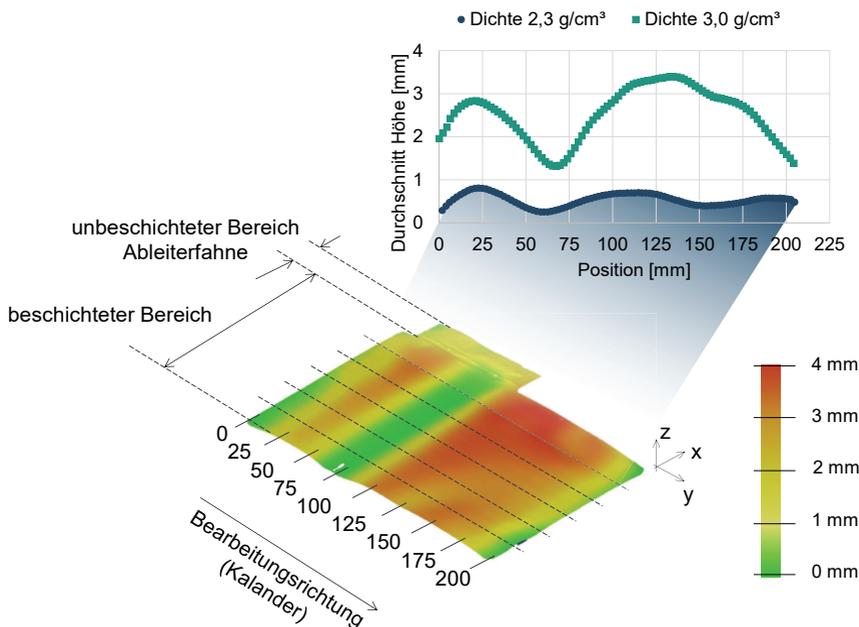
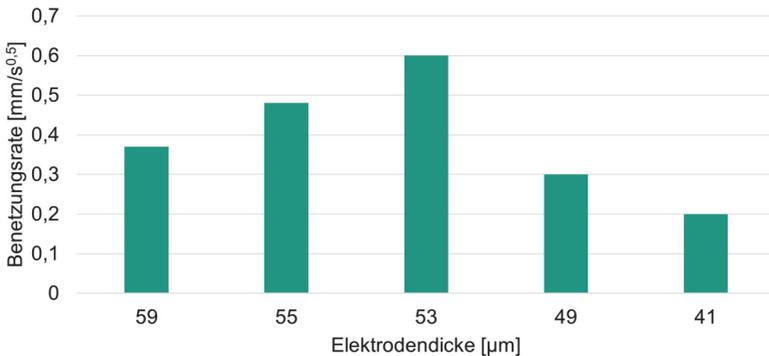


Abbildung 3-13: Auswirkung des Verdichtungsgrades auf die Welligkeit eines einzelnen Elektrodensheets (Ergebnisse aus (Mayer & Wurba et al. 2021))

Das Fehlerbild Wellenbildung tritt gemeinsam mit dem Elektrodendefekt Winkle auf und erschwert das Fügen der Ableiterfahnen mit den Ableiterblechen. Durch die Winkles verliert der Randbereich der Beschichtung die Haftung mit der Kollektorfolie. Eine geringe Haftung führt zu inaktiven Bereichen. Dies führt zu lokalen inhomogenen elektrochemischen Beanspruchungen. Schlussendlich scheidet sich Lithium an diesen Stellen ab, das sogenannte Lithium-Plating. Eine Anhäufung von Lithium-Ionen kann dabei zum Durchstechen des Separators, folglich zu einem Kurzschluss und in der Reaktionskette zu einem Durchbrennen der Batteriezelle führen.

Nach der Zellstapelbildung folgt das Befüllen mit Elektrolyt. Hierbei zeigen (Sheng & Fell et al. 2014) am Beispiel an einer Graphitanode, dass es ein Optimum zwischen dem Verdichtungsgrad und der Benetzung gibt. Abbildung 3-14 zeigt die Benetzungsrates für unterschiedliche Elektrodendicken und somit Verdichtungsgrade. Die

Benetzungsrate ist dabei die Geschwindigkeit, mit der der Elektrolyt in die Beschichtung eindringt. Die höchste Elektrodendicke stellt eine unkalandrierte Probe dar. Die geringste Elektrodendicke entspricht dem höchsten Verdichtungsgrad. Ein geringer Verdichtungsgrad sorgt für große Hohlräume und Poren, sodass eine große Menge an Elektrolyt eingebracht werden muss und nur eine geringe Benetzungsrate möglich ist. Mit steigendem Verdichtungsgrad wird die Porengröße kleiner und der Kapillareffekt größer, sodass die Benetzungsrate steigt. Hin zur maximalen Verdichtung sind nicht mehr alle Poren zugänglich beziehungsweise die Porenanzahl verringert. Dadurch nimmt die Benetzungsrate wieder ab.



*Abbildung 3-14: Benetzungsrate in Abhängigkeit zur kalandrierten Elektrodendicke
(aus (Sheng & Fell et al. 2014))*

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine starke Abhängigkeit der einzelnen Prozesse untereinander besteht. Deren Komplexität ergibt sich nicht nur durch die materialspezifischen Zusammenhänge, sondern auch durch den Einfluss jedes einzelnen Prozessschrittes auf die Batteriezellkapazität und -leistung.

3.5 Bewertung des Stands der Technik und Forschungshypothese

Der Kalandrierprozess ist, wie in Kapitel 3.3 dargestellt, materialabhängig und kann durch die in Kapitel 2.3 erläuterten Parameter Linienlast, Temperatur, Geschwindigkeit und Bahnzug beeinflusst werden. Die zu regelnde Materialgröße im Kalandrierprozess ist die Dichte der Beschichtung. Für Kathodenmaterialien ist eine hohe Energiedichte und somit eine hohe Verdichtung notwendig (Kim & Lee et al. 2018).

Die in Kapitel 3.3 beschriebenen Elektrodendefekte sind von den Bearbeitungsparametern abhängig. Die Elektrodendefekte haben ihren Ursprung in den sich unterscheidenden Materialeigenschaften der Beschichtung und des Stromsammlers. Durch den Kalandriervorgang resultieren unterschiedliche Ausdehnungen der einzelnen Materialien, siehe Abbildung 3-6, sowie eine Wrinkle-Bildung, siehe Abbildung 3-7. Je höher die gewünschte Dichte, umso höher ist die erforderliche Verdichtung und die notwendige Linienlast. Eine höhere Linienlast bedeutet eine höhere Belastung und umso stärker zeigt sich die Ausprägung und Anzahl der Elektrodendefekte, vor allem der Wrinkles. Die Verdichtung bestimmt jedoch, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, die elektrochemischen Eigenschaften der Batteriezelle, sodass eine Anpassung der Energiedichte keine Lösung für eine Vermeidung der Elektrodendefekte ist, sondern lediglich einen Kompromiss darstellen würde.

Die Prozessgröße Kalanderwalzentemperatur beeinflusst, wie in Kapitel 2.3 dargestellt, unter Einfluss der Binderverteilung die notwendige Linienlast, sodass die Elektrode bei höheren Kalanderwalzentemperaturen geringer beansprucht wird. Eine geringere Linienlast führt zu schwächeren Eigenspannungen innerhalb des Materials. Die höhere Fließfähigkeit der Beschichtung durch die hohe Kalanderwalzentemperatur führt dennoch zu einer Reduzierung des Flächengewichts und gleichzeitig zu einer Zunahme der Dehnung, vergleiche Abbildung 3-6. Diese Zustandsänderungen begünstigen die Wrinkle-Bildung.

Im Unterschied zu den Parametern Linienlast, Temperatur und Geschwindigkeit, die lediglich einen Einfluss auf den beschichteten Bereich haben, wirkt der Bahnzug über die komplette Bahnbreite vor und hinter dem Kalanderspalt. Durch das Kalandrieren verändern sich die Materialeigenschaften des beschichteten Bereichs, vor allem wird eine Dehnung in Laufrichtung eingebracht. Der unbeschichtete Bereich bleibt dabei unberührt, woraus eine Längenänderung zwischen dem beschichteten und dem

unbeschichteten Bereich resultiert. Der Prozessparameter, der den größten Einfluss auf die Wrinkle-Bildung hat, ist somit der Bahnzug, wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Ein hoher Bahnzug führt zwar zu einer starken Fehlerausprägung, ist jedoch für eine prozesssichere Handhabung erforderlich.

Die notwendige hohe Linienlast zum Erreichen der Elektrodendichte, eine hohe Kalandrierwalzentemperatur sowie ein hoher Bahnzug stellen in der Kombination das Betriebsoptimum dar. Allerdings führt diese Kombination jedoch zu einer Verstärkung der Fehlerausprägung der Wrinkles. Diese negative Korrelation bildet die Grundlage der Forschungshypothese, die besagt, dass ein Betriebsoptimum aus einer günstigen Parameterkombination für den Kalandrierprozess nach Stand der Technik bei gleichzeitiger Verhinderung des Fehlerbildes Wrinkle nicht möglich ist.

Das Ziel für ein Betriebsoptimum besteht weiterhin ungestört aus einer maximalen Verdichtung, jedoch stellt zusätzlich eine minimale Fehlerausprägung der Wrinkles eine neue Festanforderung dar. Die Materialeigenschaftsänderung durch den Kalandriervorgang, beschrieben über ΔL , siehe Abbildung 3-6, im beschichteten Bereich, muss auf den unbeschichteten Bereich übertragen werden. Hierfür ist ein Ansatz für eine zusätzliche Bearbeitung im unbeschichteten Bereich notwendig. Ziel ist es, über die gesamte Elektrode ähnliche Materialeigenschaften einzustellen.

4 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der Kalandrierprozess führt, wie in Kapitel 3.3 näher beschrieben, nicht nur zu einer Verringerung der Materialdicke, sondern auch zu einer Längung des beschichteten Bereichs. Das Einbringen von Dehnungen und Eigenspannungen ist die Ursache von Elektrodendefekten. Der Fokus liegt hierbei auf dem Elektrodendefekt Wrinkle. Kapitel 3.5 erörtert, dass ein Betriebsoptimum der Anlagenparameter Kalandrierwalzentemperatur, Bahnzug und Linienlast im Widerspruch zu der Minimierung des Elektrodendefekts steht. Zielsetzung ist, diese technische Herausforderung prozessseitig zu überwinden. Zwangsläufig ist dafür ein Zusatz an der Anlage notwendig. Ein damit neu eingebrachter Prozessparameter soll eine Dehnung in den unbeschichteten Bereich einbringen, um einen gleichmäßigen Spannungszustand über die gesamte Elektrodenbreite zu erhalten. Die Bearbeitung des unbeschichteten Bereichs muss rund um die Verdichtung, um den Kalandrierspalt, verortet sein, sodass die Längung des Randbereichs einer Wrinkle-Bildung zuvorkommt. Zusammenfassend ist das Ziel, den Kalandrierprozess um ein Zusatzmodul an der Kalandrieranlage zu erweitern, damit Dehnungen in den unbeschichteten Randbereich eingebracht werden können und die Ursache der Wrinkle-Bildung behoben ist.

Materialseitig erfolgt keine Lösungsbetrachtung, da aufgrund der stetigen Entwicklung neuer Aktivmaterialien und hohen erforderlichen Elektrodenichten keine nachhaltige Lösung möglich ist.

An erster Stelle der weiteren Vorgehensweise steht eine detaillierte und quantifizierbare Ursachenbeschreibung der Wrinkle-Bildung. Die qualitative Betrachtung der Zusammenhänge zwischen den Elektrodendefekten und der Kalandrier- wie auch Materialparameter ist in Kapitel 3.3 erörtert. Die in den folgenden Kapiteln 5.2 und 5.3 beschriebene Vorgehensweise quantifiziert die Wechselwirkungen zwischen den Prozessparametern und der Fehlerausprägung. Die Prozessparameter Geschwindigkeit, Temperatur und Bahnzug werden in experimentellen Untersuchungen variiert. Aufgrund der essenziellen Zusammenhänge zwischen den elektrochemischen Eigenschaften und der notwendigen Dichte der Beschichtung, werden die Experimente unter Einhaltung einer konstant hohen Dichte durchgeführt. Zur Vervollständigung des Prozessverständnisses werden dennoch unterschiedliche Dichten betrachtet. Allerdings werden die dazugehörigen Ergebnisse nicht in die Betrachtung der Prozessoptimierung miteingeschlossen.

Eine elementare Voraussetzung zur Durchführung der Versuchsreihen ist die quantifizierte Beschreibung des Elektrodendefektes Wrinkle. Hierzu erfolgen Messungen der Geometrie der Wrinkles sowie Aufnahmen der Verzerrung der Elektrode. Standardmethoden oder Forschungsarbeiten sind dazu nicht vorhanden. Aufgrund dessen müssen Messmethoden zur Wrinkle-Vermessung und zur Dehnungsdetektion für kalandrierte Elektroden erarbeitet werden. Es besteht dabei die eigene Anforderung die Messungen sowohl in den Prozess zu integrieren, als auch materialunabhängig funktionsfähig zu sein. Die Detektion der Elektrodendefekte in Kombination mit einer Variation der Prozessparameter dient nicht nur der Beschreibung der Fehlerentstehung, sondern soll sich fortlaufend zur Qualitätssicherung eignen.

Der Aufbau der Detektionsverfahren in Kapitel 5.2 und 5.3 für die Elektrodendefekte erfolgt materialunabhängig. Dennoch ist der Prozess materialabhängig, sodass zusätzlich ein Verständnis für das Materialverhalten geschaffen wird. Dafür werden die mechanischen Eigenschaften der Elektrode bestimmt. Aufgenommen werden hierbei die Materialcharakteristika über Zugversuche und Haftkraftversuche, die die Veränderung der mechanischen Bindung zwischen Beschichtung und Kollektor durch das Kalandrieren aufzeigen. Die mechanischen Eigenschaften werden für Elektroden in den unterschiedlichen Bearbeitungszuständen aufgenommen.

Die Erarbeitung des Prozessverständnisses zum Kalandrieren und der Wrinkle-Bildung führt weiterhin zur Ableitung der notwendigen Funktionen für das Zusatzverfahren und zur Definition der Anforderungen an den neuen Prozess. Wie eingangs beschrieben, lassen die verfügbaren Prozessparameter keinen Spielraum zu, sodass ein neuer Prozessparameter über einen Prozesszusatz, als Anti-Wrinkle-Modul bezeichnet, geschaffen werden muss.

Der Aufbau und die Funktionsweise des Anti-Wrinkle-Moduls wird in Kapitel 7.3 beschrieben. Die Erfüllung der erforderlichen Funktionen dessen wird über Versuchsreihen inklusive des Anti-Wrinkle-Moduls nachgewiesen. Zum Einsatz kommen dabei die eigenentwickelten Messmethoden aus Kapitel 5.2 und 5.3. Damit ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus Kapitel 5.1 gewährleistet. Folglich kann eine Beurteilung und Bewertung des Zusatzprozesses in Kapitel 8 erfolgen.

5 Prozessverständnis der Wrinkle-Bildung

5.1 Experimentelle Vorgehensweise zur Beschreibung der Wrinkle-Bildung

Die Herangehensweise zur Ermittlung des Prozessverständnisses der Wrinkle-Bildung erfolgt hauptsächlich experimentell. Das Prozessverständnis, die Erklärung der Wrinkle-Ursachen, als auch die Herausforderungen der Vermeidungsmaßnahme werden in Kapitel 6 durch Simulationen gestützt.

Die zur Durchführung der Experimente verwendeten Elektroden sind beidseitig beschichtete Kathoden mit den Aktivmaterialien NMC 622 und NMC 811. Für die Kathoden mit dem Aktivmaterial NMC 622 werden zwei unterschiedliche Flächengewichte herangezogen, sodass in Summe drei Versuchsmaterialien zur Verfügung stehen. Die Kathoden zeigen in Bezug auf die Wrinkle-Bildung und aufgrund der spröden mechanischen Materialeigenschaften nach dem Kalandrieren eine größere Herausforderung im Vergleich zu Anodenmaterialien, wie in Kapitel 3.3 erläutert. Dies bedingt eine Auslegung des Zusatzverfahrens für Kathodenmaterialien. Dennoch vernachlässigt dies nicht die Betrachtung der Übertragbarkeit auf unterschiedlichste Elektrodenmaterialien.

Das verwendete Elektrodenmaterial NMC 622 wird in zwei Beladungsstufen verwendet. Die erste Beladungsstufe trägt ein einseitiges Flächengewicht von $17,9 \text{ mg/cm}^2$ und die zweite eine um 40 % höhere Flächenbeladung von $25,1 \text{ mg/cm}^2$. Es kommen jeweils eine $15 \text{ }\mu\text{m}$ dicke Aluminiumfolie als Stromsammler der Firma Speira GmbH vom Typ 1100-L-H19 zum Einsatz. Die Beschichtung hat einen Li-NMC-Anteil von 94,7 % vol, wobei Graphit 3 %, Ruß 1 % und ein PVDF-Binder 1,5 % ausmachen. Die Untersuchungen erfolgen stets mit symmetrischen und durchgehenden Beschichtungen. Die Breite des Aluminiumkollektors beträgt hierbei 200 mm und die der Beschichtung 150 mm.

Das dritte Versuchsmaterial ist die nickelreichere Kathode, die einen Anteil von 94 % an NMC 811-Aktivmaterial, 3 % an Carbon Black und 3 % an Binder besitzt. Die Flächenbeladung der Beschichtung beträgt $20,8 \text{ mg/cm}^2$, die auf eine $15 \text{ }\mu\text{m}$ dicke Aluminiumfolie aufgebracht ist. Die Wahl eines Stromkollektors mit der gleichen Foliendicke gewährleistet die Vergleichbarkeit. Die Beschichtung ist mit einer Breite von 155 mm auf einer 215 mm breiten Aluminiumfolie aufgetragen.

Der Kalandrierprozess wird in der DoE (Design of Experiment), beschrieben in Kapitel 5.4, über die Parameter Kalenderwalzentemperatur, Kalandriergeschwindigkeit und Bahnzug variiert. Aufgenommen werden dabei maschinenseitig die aufgebrachte Linienlast sowie die Veränderungen der Materialeigenschaften. Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht über die zu jedem Experiment geführten Versuchsprotokolle. Der Zustand der Elektrode wird demnach durch die Materialdicke, das Flächengewicht und die Dichte der Beschichtung sowie die Haftkraft vor, wie auch nach dem Kalandrieren aufgenommen. Zusätzlich zu den festgehaltenen Anlagenparametern enthält das Protokoll Kennzahlen für die Wrinkle-Geometrie und die Verzerrung der Elektrode.

Tabelle 5-1: Übersicht des Versuchsprotokolls

d	Querprofil der Materialdicke
ρ_A und ρ_B	Flächengewicht und Dichte der Beschichtung
F_{Haft}	Haftkraft der Beschichtung auf dem Kollektor
$x_{Kalandrier}$	Anlagenparameter
q_L	Aufgezeichnete Linienlast
w	Bestimmung der Wrinkle-Geometrie
ε	Verzerrung der Beschichtungsoberfläche

Zur exakten Zuordnung der Größen bezüglich der Elektrodenorientierung wird ein Koordinatensystem festgelegt, siehe Abbildung 5-1. Die y-Achse entspricht der Bearbeitungsrichtung und die x-Achse zeigt quer zur Bearbeitungsrichtung. Folglich beschreibt die z-Achse die Höhe ausgehend von der Elektrodenoberfläche.

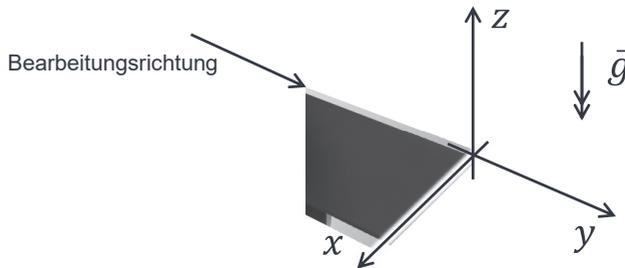
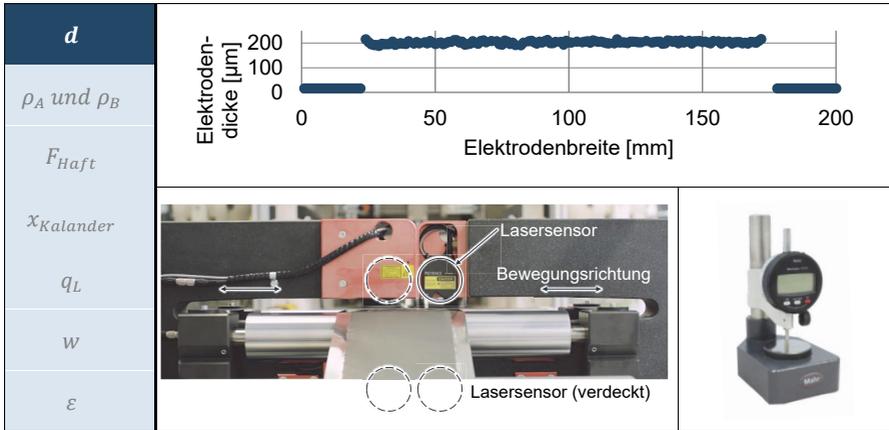


Abbildung 5-1: Definiertes Koordinatensystem für Elektroden

Als erster materialseitiger Parameter wird die Elektrodendicke im Querprofil aufgenommen. Die Messung erfolgt über das am Kalandrierer verbaute Dickenmesssystem mittels Lasertriangulationssensoren, abgebildet in Tabelle 5-2. Die Punktlasersensoren LK-H022 haben eine Wiederholgenauigkeit von $0,02 \mu\text{m}$. Die Elektroden werden dabei mit dem für den Prozess notwendigen Bahnzug beaufschlagt, währenddessen befindet sich die Anlage im Stillstand. Somit ist gewährleistet, dass sich die Elektrode für die Dickenmessung im Arbeitsbereich der Lasersensoren befindet. Die Messung der unkalandrierten Probe zeigt, ob die Probe eine gleichmäßige Dicke über die Elektrodenbreite aufweist und ob Effekte aus dem Beschichtungs- und Trocknungsprozess, beschrieben in Kapitel 3.3, wie beispielsweise eine Randüberhöhung zu erkennen sind. Das Phänomen eines überhöhten Beschichtungsrandes verstärkt den Effekt der Winkle-Bildung (Schmitt & Diehm et al. 2015). Die Aufnahme des Querprofils für den kalandrierten Zustand, siehe Tabelle 5-2, gibt Aufschluss darüber, ob die Verdichtung über die Breite homogen erfolgt ist. Der Arbeitsbereich der Sensoren beträgt 20 mm, sodass eine Wellenbildung, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, zu ungültigen Messwerten führen kann. Um die Verfälschung durch Spiegelungen zu mindern, verharren die Sensoren 5 Sek. an jeder Messstelle. Zusätzlich wird die Dickenmessung über eine taktile Messuhr durchgeführt. Die Messung dient stichprobenartig der Überprüfung der Dickenmesswerte aus der Messung mittels Lasertriangulationssensoren.

Tabelle 5-2: Dickenmessung



Weiterhin sind stark verdichtete Proben mit einer hohen Oberflächenreflexion und ausgeprägter Wellenbildung nicht über die Lasersensoren messbar. Die optionale taktile Messung der Elektrodendicke erfolgt über die Messuhr Mahr 1075 R, die eine Wiederholgenauigkeit von 1 µm besitzt. Der Messtaster ist rund und hat einen Durchmesser von 4,5 mm.

Die Dicke der Elektrode wird zusätzlich an über die gesamte Breite verteilten Stanzlingen vermessen, siehe Tabelle 5-3. Zum einen dient dies der Überprüfung der Dickenmesswerte aus der Messung mittels Lasertriangulationssensoren, zum anderen sind die Messwerte für die Berechnung der Zieldicke über die Zieldichte erforderlich.

Die Berechnung erfolgt über die Formel in Tabelle 5-3, die das Verhältnis aus aktueller Dichte zur Zieldichte bildet. Da die Dichte nicht über Messmittel an einer Kalandrierlinie bestimmbar ist, wird über Proben mit definierter Geometrie das Flächengewicht herangezogen und über die Dicke die Dichte berechnet. Das Heraustrennen der Proben beziehungsweise Stanzlinge hat keinen Einfluss auf die Dicke oder das Flächengewicht der Elektrode. Das Stanzen erfolgt mittels einer Handstanze, siehe Tabelle 5-3. Die Kreisproben haben einen Durchmesser von 18 mm. Die Dicke und das zugehörige Flächengewicht werden für die zwei Zustände unkalandriert und kalandriert aufgenommen. Der Vergleich der Messwerte lässt Rückschlüsse auf die Ausdünnung der Elektrode zu, wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben. Die Verdichtung führt nicht

ausschließlich zu einer Verdichtung der Beschichtung, sondern auch zu einer Verdrängung des Materials in Lauf- und Querrichtung. Zur Ermittlung des Flächengewichts der Elektrode wird eine Präzisionswaage benutzt. Die Präzisionswaage EW 220-3NM hat einen Wägebereich von 220 g und erlaubt Messungen mit einer Linearität von 0,002 g, in Tabelle 5-3 abgebildet.

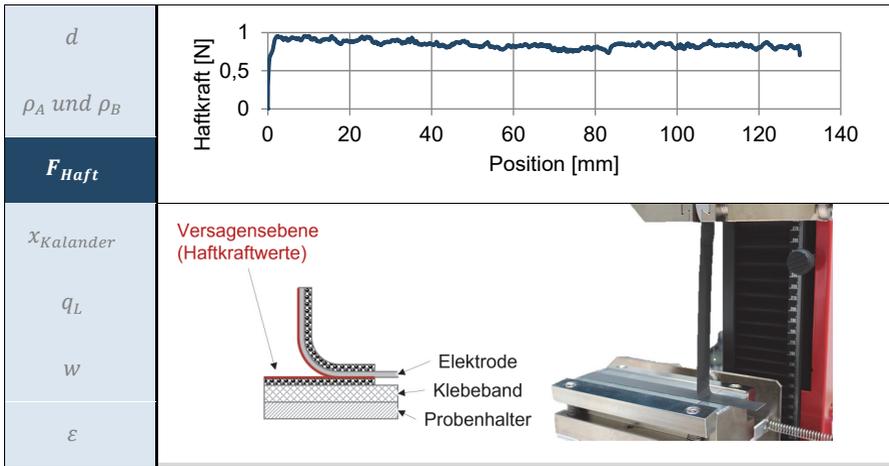
Tabelle 5-3: Bestimmung von Flächengewicht und Dichte

d		
ρ_A und ρ_B		
F_{Haft}	$d_{Ziel} = \frac{\rho_A}{\rho_{Ziel}} + d_{Kollektor} = \frac{(m_{Elektrode} - m_{Kollektor})}{\rho_{Ziel} \cdot A_p} + d_{Kollektor}$	
$x_{Kalander}$		
q_L		
w		
ε		
		

Weiter aufgenommen wird die Haftkraft zur Beurteilung der Haftfestigkeit. Die Probenbreite bleibt über alle Versuchsreihen mit 18 mm unverändert. Anstatt eines möglichen Abzugsversuchs wird ein Abschälversuch durchgeführt, um die Auflösung der Haftkraft über die Elektrodenbreite untersuchen zu können. Die Haftkraft beschreibt, wie in Kapitel 3.3 ausgeführt, im Allgemeinen die Adhäsionskraft zwischen der Beschichtung und dem Stromsammel beziehungsweise die Kohäsionskraft im Falle einer Schwachstelle innerhalb der Beschichtung. Zur Versuchsdurchführung wird die Elektrode in Streifen geschnitten und auf einem Probenhalter mit doppelseitigem Klebeband, des Typs Tesa 4965 von 19 mm Breite, mit einer konstanten Kraft befestigt. Das Abziehen des Kollektors in einem Winkel von 90° erfolgt mit einer Zugprüfmaschine mit der Produktbezeichnung 2,5 kN Zwicki RetroLine des Unternehmens ZwickRoell, siehe Tabelle 5-4. Die verwendete Kraftmessdose hat einen zulässigen Kraftbereich bis 2,5 kN. Mit einer Probenbreite von 18 mm erfolgt die Aufzeichnung der Haftkraft über die Probenlänge von 130 mm. Zu bestimmen ist dabei der Durchschnittswert der Haftkraft wie auch die

Ausprägung der Haftkraft im Randbereich. Die Auswirkung der Wrinkle-Bildung wird von einem Haftkraftverlust begleitet, wie in Abbildung 3-7 zu erkennen. Im Allgemeinen führt das Kalandrieren zu einer Steigerung der Haftkraft, sodass aufgrund der verstärkten Verankerung ein Ablösen der Beschichtung vom Kollektor in der eigentlichen Benutzung der Batteriezelle entgegengewirkt wird.

Tabelle 5-4: Haftkraftmessung



Ein wichtiger Aspekt zur Beurteilung der Ergebnisse der Haftkraftmessung im Abschältest ist der Zustand der Beschichtung auf der gegenüberliegenden Seite. Eine Darstellung der Phänomene ist der Abbildung 5-2 zu entnehmen. Eine intakte Beschichtung, Abbildung 5-2 b), führt zu einem größeren Radius am Abschälort $r_2 > r_1$ und aufgrund der stärkeren Stützstruktur ist der mechanische Widerstand größer, $c_2 > c_1$. Dadurch verlagert sich der Abschälort weiter nach rechts, siehe Abbildung 5-2. Diese Verlagerung und die Krümmung im Material sorgen für einen Hebelarm und somit für eine Verfälschung der gemessenen Werte an der Kraftmessdose. Die vorgestellten Ergebnisse in Kapitel 6.1 beinhalten Haftkraftuntersuchungen, die stets für den Fall a) aus Abbildung 5-2 durchgeführt sind. Hierbei wird kein Anspruch auf eine allgemeingültige Richtigkeit für eine Haftkraftprüfung erhoben, sondern die Gewährleistung der Gleichheit aller Versuche. Das Abschälverhalten für den 90°-Test gilt für unkalandrierte wie auch kalandrierte Elektroden.

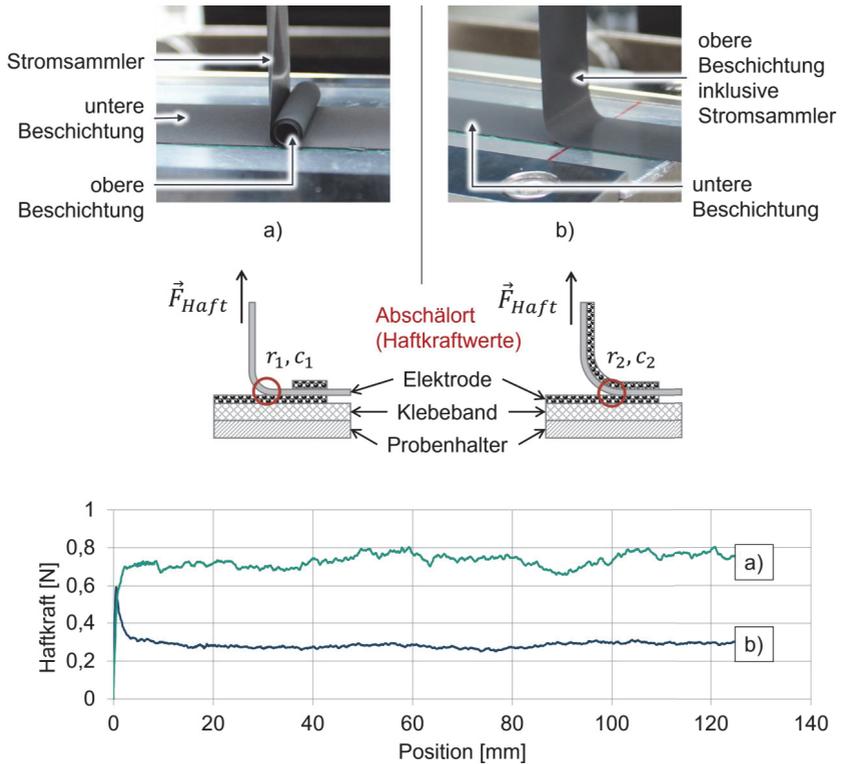


Abbildung 5-2: Verhalten der oberen Beschichtung in der Haftkraftmessung und Auswirkung auf das Messergebnis

Abbildung 5-3 zeigt den Einfluss der Dichte der kalandrierten Elektroden auf die Untersuchung der Haftkraft. Links in Abbildung 5-3 ist der Kollektor nach dem Abschälversuch mit einer 50-fachen Vergrößerung an einem Auflichtmikroskop aufgenommen. In Abbildung 5-3 rechts sind die aufgenommenen Haftkräfte für eine unkalandrierte Probe und drei weiteren Kalandrierdichten dargestellt. In der Mikroskopaufnahme der kalandrierten Probe sind die Eindrücke der Aktivmaterialpartikel in den Kollektor erkennbar. Dies bedeutet, dass eine Verformung der Folie, wie auch eine starke Verankerung der Partikel in der Kollektorfolie hervorgerufen wird. Dieser Einfluss sowie das zueinander Drücken und Verankern der Aktivmaterialpartikel bei höheren Dichten sorgen für eine höhere Haftkraft. Die Versagensebene im Haftkraftversuch wird mit steigenden Dichten von der Kollektorfolie in die Beschichtung verlagert. Die Ursache liegt in der stärkeren Verankerung der Aktivmaterialpartikel in die Kollektorfolie und in Partikelbrüche.

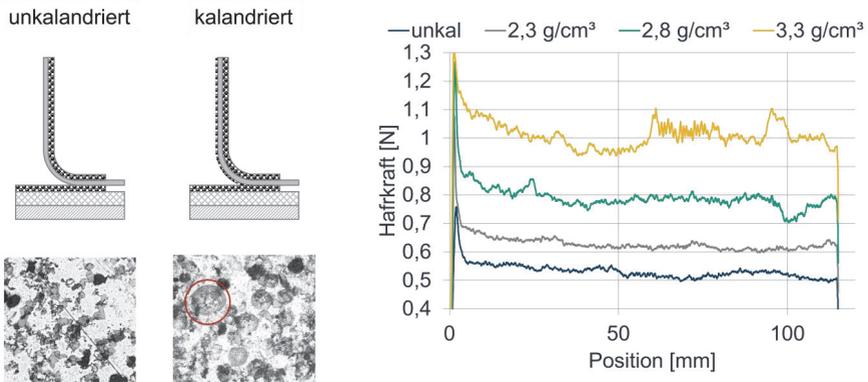


Abbildung 5-3: Veränderung der Versagensebene für die Haftkraftmessung

Für jeden einzelnen Kalandrierversuch werden für die Haftkraftmessungen drei Proben aus der Elektrode im unkalandrierten wie auch im kalandrierten Zustand entnommen, siehe Abbildung 5-4. Bei den zwei Proben 1 und 2 erfolgt die Aufnahme der Haftkraft quer zur Bearbeitungsrichtung, bei der dritten Probe erfolgt die Haftkraftmessung in Bearbeitungsrichtung. Die Proben 1 und 2, vergleiche Abbildung 5-4, zeigen die Auswirkungen der Randbereiche auf beiden Seiten. Hierbei ist zum einen die Homogenität der Haftkraft über die Beschichtungsbreite bewertbar, zum anderen die Einflüsse der Wrinkles auf den Randbereich. Beispielhaft zeigen die Kurven 1 und 2 eine abfallende Haftkraft für eine kalandrierte Probe mit Wrinkles. Dabei sind eine Überlagerung mit

Randfehlern aus der Beschichtung, siehe Kapitel 2.3, nicht ausgeschlossen. Die Probe 3 wird mittig an der Beschichtungsbreite ausgerichtet und ergibt den Vergleichswert für die einzelnen Kalandrierversuche untereinander.

Die vorgestellten Untersuchungsmethoden in Tabelle 5-2, Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 werden jeweils vor und nach dem Kalandrieren der Elektroden durchgeführt.

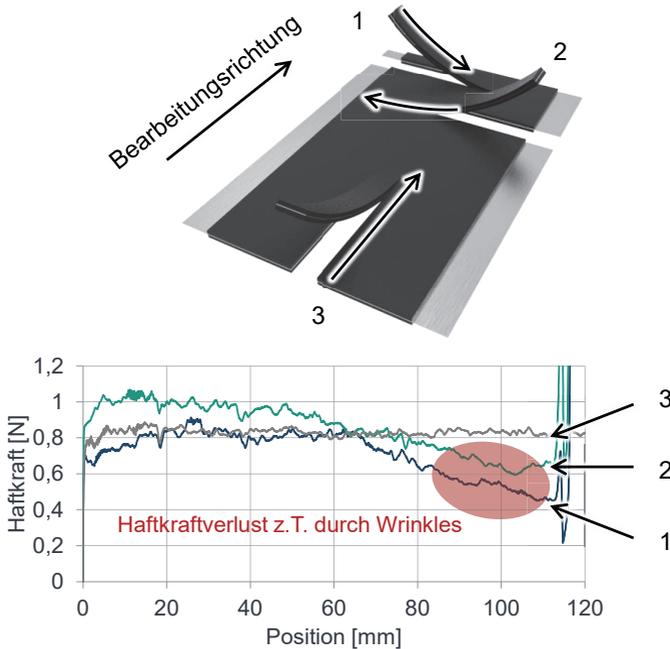


Abbildung 5-4: Positionen der Abschälproben

Anlagenseitig werden die Parameter Bahnzug, Geschwindigkeit, Temperatur der Kalandrierwalzen und die Linienlast aufgezeichnet. Tabelle 5-5 gibt hierzu einen Überblick über die Verortung an der Anlage. Festgehalten werden dabei der Bahnzug des Abwicklers, der Bahnzug am Zugwerk und der Bahnzug am Aufwickler. Dies entspricht den drei Positionen, mit denen die Bahnzugkraft auf die Elektrodenbahn eingestellt wird. Auch die Kalandrierwalzentemperatur und die Geschwindigkeit werden an der Anlage vorgegeben. Die Aufzeichnung der Linienlast wird mit Tabelle 5-6 näher erläutert.

Tabelle 5-5: Protokollierung der Anlagenparameter

d				
ρ_A und ρ_B				
F_{Haft}				
$x_{Kalandere}$				
q_L				
w	T_{KW}	Kalanderewalzentemperatur	\vec{F}_{Ab}	Bahnzugkraft Abwickler
	q_L	Linienlast	\vec{F}_{Zug}	Bahnzugkraft Zugwerk
ε	v_{KW}	Geschwindigkeit der Kalanderewalze	\vec{F}_{Auf}	Bahnzugkraft Aufwickler

Die Temperatur kann in einem Bereich von Raumtemperatur bis zu 90 °C eingestellt werden. Ein aktives Kühlen ist nicht möglich. Die Temperierung wird mit einer Mindestvorlaufdauer von einem Tag betrieben, sodass gewährleistet ist, dass alle betroffenen Maschinenteile sich aufgrund der Abwärme nicht weiter ausdehnen und dadurch die Spalteinstellung nicht beeinflussen. Messungen mit einer Infrarotkamera am Kalanderewalzenauslauf zeigen in Abbildung 5-5 die Übertragung der Kalanderewalzentemperatur auf die Elektrode. Bei den Infrarotaufnahmen ist zu beachten, dass aufgrund der spiegelnden Oberfläche der Kalanderewalzen deren Temperatur nicht aufgezeichnet werden kann. Die Farben zeigen entsprechend der Skala die Temperatur der Elektrode, teilweise gespiegelt in den Kalanderewalzen. Zu erkennen ist, dass die Kalanderewalzensolltemperatur von 90°C auf die Elektrode übertragen wird. Bei der maximalen Verarbeitungsgeschwindigkeit von 30 m/min ist die Wärmeübertragung trotz der geringeren Kontaktzeit zwischen Kalanderewalze und Elektrode ausreichend. Weiterhin ist festzustellen, dass die Elektrode die Wärme schnell abgibt, vergleiche Abbildung 5-5 für 1 m/min.

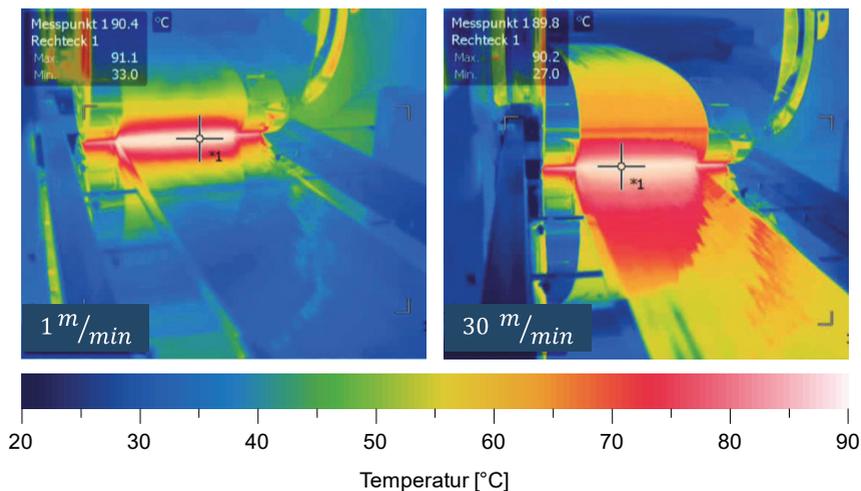


Abbildung 5-5: Temperaturaufzeichnung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Die vorgegebene Geschwindigkeit wird der Kalandrwalze als Sollgeschwindigkeit vorgegeben und auf das Material übertragen. Zur Überprüfung der tatsächlichen Geschwindigkeit ist ein Drehgeber an der Auslaufseite des Glättwerks angebracht, der Elektrodengeschwindigkeit misst. Der Drehgeber besitzt eine gummierte Lauffläche und drückt auf das Elektrodenmaterial. Die aufgezeichneten Schwankungen um die Sollgeschwindigkeit von 1 m/min in Abbildung 5-6 werden sowohl durch den Schlupf im Kalanderspalt, als auch den Schlupf zwischen dem Drehgeber und der Elektrode verursacht. Des Weiteren sind Abweichungen durch die Steuerung zu berücksichtigen. Die Aufzeichnung zeigt, dass die eingegebene Sollgeschwindigkeit erreicht wird und dabei eine Abweichung, gemäß einer Standardabweichung, von 0,02 m/min auftritt.

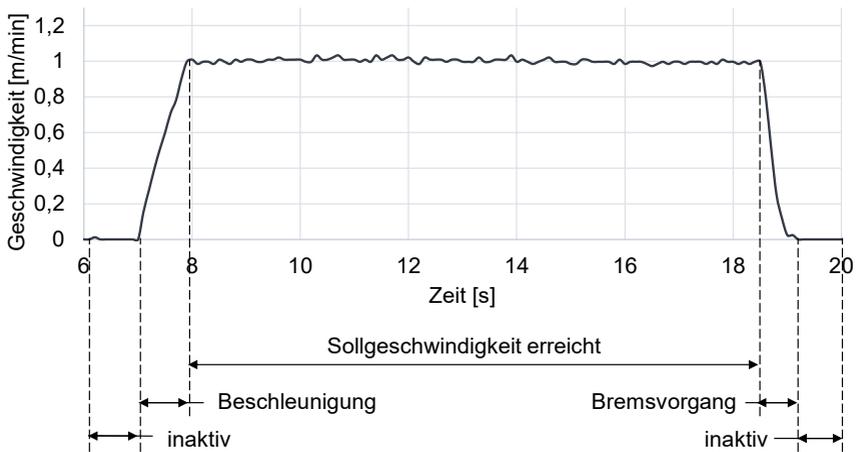
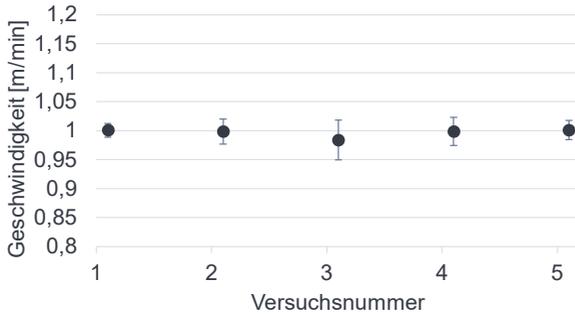
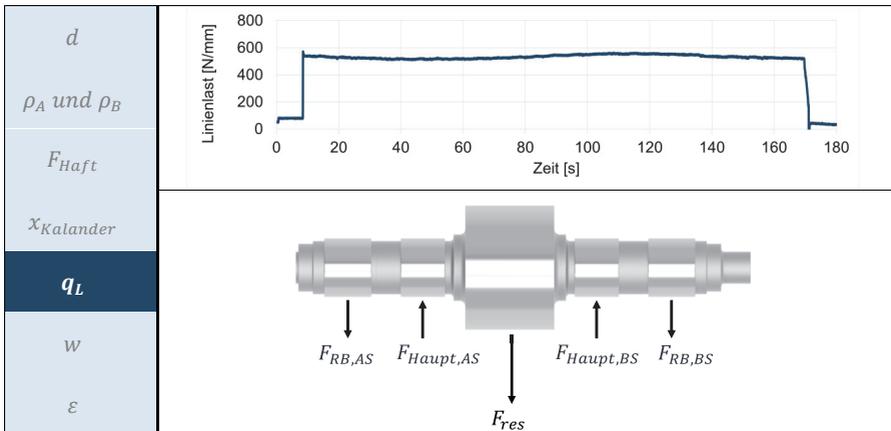


Abbildung 5-6: Messdaten der Elektrodenbahngeschwindigkeit

Die Linienlast gehört zu den weiteren aufgezeichneten Anlagenparametern. Diese ist, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, der Parameter, der angibt, wie hoch die Kraft bezogen auf die Beschichtungsbreite zum Verdichten des Materials ist. Bei gleicher Anlage und homogenem Material ist die Linienlast die entscheidende Prozessgröße zur wiederholgenauen Durchführung von Experimenten unter gleichen Randbedingungen. Die Linienlast ist zudem ein Maß für die Belastung des Materials und somit der Ausprägung der Elektrodendefekte. Diese wird, wie in Tabelle 5-6 festgehalten, kontinuierlich aufgezeichnet und über die Kräfte der Hydraulikzylinder berechnet. Die Kraftmessdosen an den Hydraulikzylindern lassen eine Genauigkeit in der Linienlastberechnung von

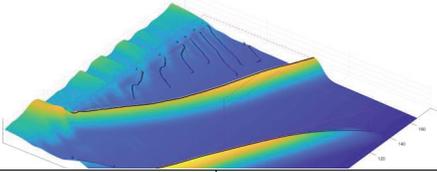
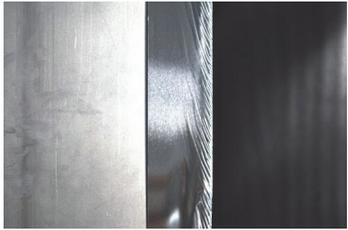
1,7 N/mm zu. Die kraftaufbringenden Zylinder werden, wie in Kapitel 3.2, als Roll-Bending Zylinder, kurz RB-Zylinder bezeichnet. Die Bezeichnung AS bedeutet Antriebsseite und die Abkürzung BS Bedienerseite. Die Kräfte der Hauptzylinder werden mit den Kräften der RB-Zylinder unter Berücksichtigung der Hebelarme verrechnet. Das Kräftegleichgewicht ergibt die resultierende Kraft im Walzenspalt. Diese wird durch die Beschichtungsbreite dividiert und als Linienlast angegeben.

Tabelle 5-6: Aufzeichnung der Linienlast



Die in Tabelle 5-7 dargestellte Aufnahme der Wrinkles wird in Kapitel 5.3 näher erläutert. Zur Detektion der Wrinkles werden zwei Varianten verwendet. Die erste Variante sieht einen Linienlasersensor am Kalanderauslauf vor. Der Linienlasersensor nimmt ein Profil mit einer Breite von 60 mm auf. Dabei beträgt die Wiederholgenauigkeit bezüglich der Höhe $0,4 \mu\text{m}$ und die Wiederholgenauigkeit in der Breite $5 \mu\text{m}$. Der Sensor scannt mit einer vorgegebenen Frequenz den Randbereich, sodass eine dreidimensionale Oberfläche für die Auswertung zur Verfügung steht. Bei der zweiten Variante kommt eine Kamera zum Einsatz, die am Kalanderauslauf angebracht ist. Der Sensor der Kamera hat eine Auflösung von 5472×3648 Pixel (20 MP) und das Objektiv eine Brennweite von 50 mm. Der Bildausschnitt der Aufnahme am Randbereich der Elektrode, siehe Tabelle 5-7, lässt die Wrinkles erkennen und auswerten. Für beide Varianten erfolgt eine Bestimmung der geometrischen Ausprägung über die Länge, Breite und Höhe jedes einzelnen Wrinkle.

Tabelle 5-7: Vermessung der Wrinkle-Geometrie

d	
ρ_A und ρ_B	
F_{Haft}	 
$x_{Kalander}$	
q_L	
w	
ε	

Zur weiteren Beurteilung des Materialverhaltens erfolgt die Detektion der Elektrodenverzerrung an der Beschichtungs­oberfläche, wie in Tabelle 5-8 dargestellt. Für diese Materialgröße sind zwei Systeme im Einsatz. Das erste System stellt eine Inline-Lösung dar. Punkte werden auf die Elektrode über ein Inkjet-Verfahren gedruckt und über ein Stereokamerasystem, siehe Tabelle 5-8 links, jeweils vor und nach dem Kalandrieren aufgenommen. Die einzelnen Kameras weisen dabei eine Auflösung von 5472 x 3648 Pixel (20 MP) auf und haben ein Objektiv mit einer Brennweite von 50 mm. Der Vergleich der Punktwolken zueinander lässt lokale Verschiebungen berechnen, wodurch die Verzerrung der Elektrodenoberfläche ausgewertet werden kann. Die zweite Variante ist ein Gesamtsystem des Unternehmens Carl Zeiss GOM Metrology GmbH. Hierbei handelt es sich um ein portables Messsystem mit der Bezeichnung ATOS Core 135, siehe Tabelle 5-8 rechts. Im Vergleich zum in der Arbeit entstandenen System kann es größere Flächen scannen und somit großflächige Phänomene und dreidimensionale gescannte Strukturen aufnehmen, jedoch ist es nicht für die Inline-Anwendung geeignet. Details zu Ausführung und Umgang mit den Messsystemen werden in Kapitel 5.2 erläutert.

Tabelle 5-8: Aufnahme der Materialverzerrung

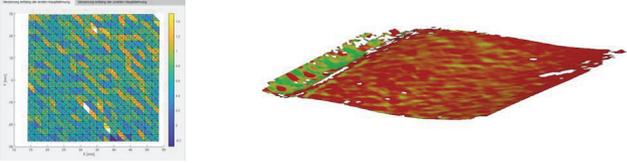
d	
ρ_A und ρ_B	
F_{Haft}	
$x_{Kalandrier}$	
q_L	
w	
ε	

Abbildung 5-7 zeigt, an welchen Stellen der Anlage Messwerte aufgenommen werden und wo die Messsysteme, die in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden, verbaut sind. Nach dem Abwickler, dem Reinigungssystem und der Tänzerwalze erfolgt das Drucken des Punktemusters. Nach der Aufnahme dieses Musters über das erste Stereokamerasystem wird die Elektrode kalandriert. Unmittelbar nach den Kalandrierwalzen erfolgt eine weitere Aufnahme zur Auswertung der Verzerrung und der Winkles. Die Winkles werden zusätzlich kurz vor der ersten Umlenkwalze des Zugwerks erneut mit dem Linienlasersensor aufgenommen. Vor der Aufwicklung des Materials erfolgt die Dickenmessung, die ebenso zur Querprofildetektion genutzt wird. Abbildung 5-7 zeigt den Bahnverlauf der Elektrode, der dem Standardbahnverlauf des Kalandriers entspricht.

5.2 Verzerrungsdetektion

Die Versuchsdurchführung innerhalb der vorliegenden Arbeit sieht zu jedem Experiment, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, die Aufnahme der Verzerrung der Elektrode vor. Die qualitative Beschreibung der Wrinkle-Bildung in Kapitel 3.3 sowie die Grundlagen des Walzprozesses aus Kapitel 2.3 beschreiben zum einen die Verzerrung als maßgebliches Phänomen beim Kalandrieren von Materialien, zum anderen den Verzerrungsunterschied zwischen dem beschichteten und dem unbeschichteten Bereich als Ursache der Wrinkle-Bildung. Die Verzerrungsdetektion ermittelt somit die Belastung der Elektrode an der Elektrodenoberfläche und stellt insbesondere in Bezug auf die Wrinkle-Bildung den Zustandsunterschied des beschichteten zum unbeschichteten Bereich dar, wie in (Bold & Fleischer 2018) beschrieben.

Die Elektrode liegt im unkalandrierten Zustand eben vor. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, führt das Kalandrieren nicht nur zu einer Verringerung der Materialdicke, sondern auch zu einer Verschiebung der Beschichtung und damit zu einer Wellenbildung im beschichteten Bereich. Zu erkennen ist dieses Phänomen mit hinterlegten Messwerten in Abbildung 5-8.

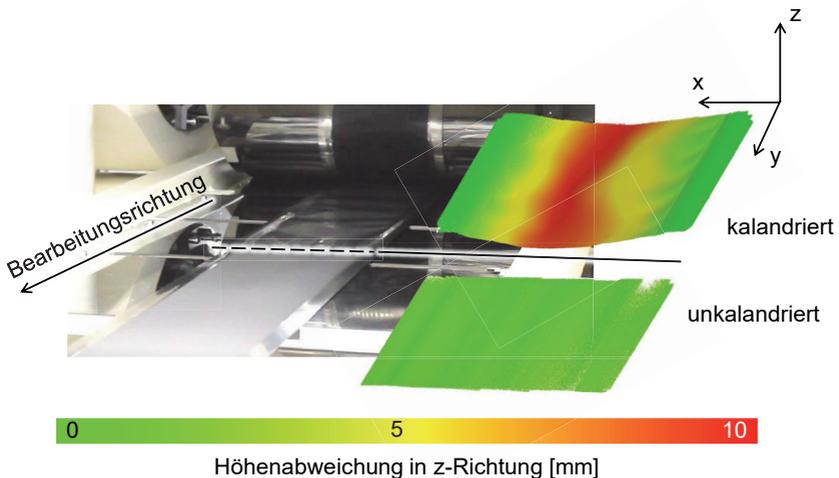


Abbildung 5-8: Vergleich der Welligkeit einer unkalandrierten und kalandrierten Elektrode am Kalandrierwalzenauslauf in [mm]

Die Darstellung aus Abbildung 5-8 zeigt, dass eine Verzerrungsdetektion nicht im zwei-dimensionalen Raum erfolgen kann, sondern dass die Detektion der Punkte und Muster im dreidimensionalen Raum stattfinden muss. Des Weiteren ist bei der Auswertung zu berücksichtigen, dass es sich um einen Vergleich zwischen einem unkalandrierten und kalandrierten Zustand handelt und vorhandene Eigenspannungen aufgrund der vorhergehenden Prozessschritte nicht detektiert werden können.

Die zur Messung der Elektrodenverzerrung notwendigen Systeme sind in Abbildung 5-9 dargestellt. Eine Festanforderung an das System ist die Inline-Fähigkeit. Das Gesamtsystem besteht aus drei Teilsystemen und enthält ein Drucksystem sowie zwei Stereokamerasysteme zur Bildaufnahme. Die Druckeinheit ist mit den Kameraeinheiten über einen Kontrastsensor verbunden, sodass die Aufnahme ausgelöst wird, sobald sich das Muster unterhalb der Kameras befindet. Die Systeme sind an einem Windows-PC angeschlossen und werden über Matlab bedient und gesteuert.

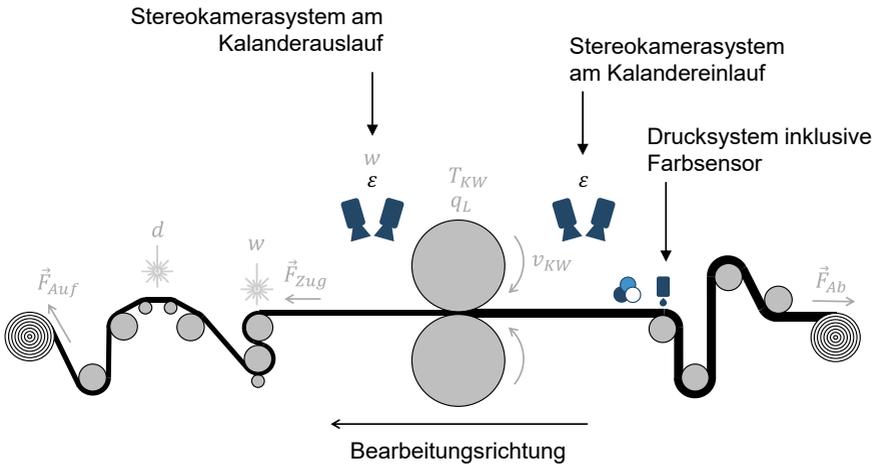


Abbildung 5-9: Systeme zur Verzerrungsdetektion

Das Drucksystem an sich besteht aus CNC-Achsen zur Bewegung des Druckkopfs sowie aus der dazugehörigen Steuerung. Der Datenfluss und die Befehlseingabe erfolgen über einen Windows-PC an den Druckkopf, siehe Abbildung 5-10. Der Druckkopf und dessen Steuerung sind vom Unternehmen HSA Systems bezogen und die hardwareseitige Kommunikation zwischen der HSA Steuerung und dem Windows-PC in

(A_Zipperling 2019) erarbeitet. Über den PC wird das Druckmuster der Druckersteuerung übergeben. Der Druckkopf besitzt einen Infrarot-Abstandssensor, der das Startsignal an die Steuerung gibt. Das Startsignal wird dabei durch den Elektrodenrand bei der Bewegung des Druckkopfs quer zur Bearbeitungsrichtung ausgelöst.

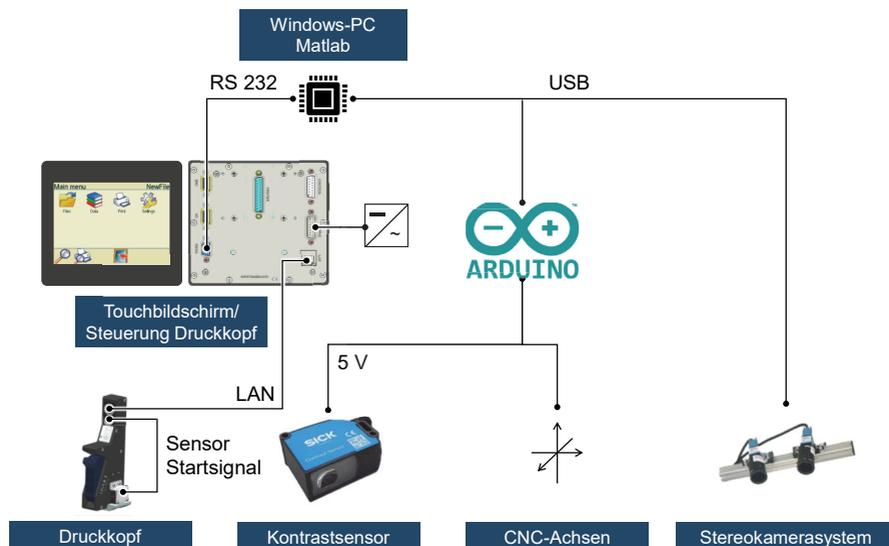


Abbildung 5-10: Überblick über das Druck- und Kamerasystem

Das Druckmuster besteht aus einer Markierung, aus Datum und Uhrzeit und aus einer Punktematrix, dargestellt in Abbildung 5-11 a) und b). Die Markierung dient dem Auslösen des Kontrastsensors, der das Signal zur Bildaufnahme weiterleitet. Datum und Uhrzeit sorgen für eine eindeutige Zuordnung der Versuchsnummer zum Elektrodenmaterial. Das Druckzeichen entspricht einer Kreisfläche, der 20-mal pro Reihe wiederholt wird. Aufgrund der bekannten Geschwindigkeit der CNC-Achsen wird das Druckmuster zeitgesteuert aufgebracht, sodass kein externer Trigger benötigt wird. Zur Erstellung der Punktematrix wird der Druckkopf nach dem Beenden des Druckens einer Punktereihe seitlich der Elektrode verfahren und zur neuen Position gebracht. Da sich der Druckkopf seitlich von der Elektrode befindet, wird das Startsignal beim erneuten Darüberfahren über den Elektrodenrand ausgelöst. Die Punktematrix besteht aus 20 Punktereihen, wobei die Punkte einen Durchmesser von 1 mm und die Mittelpunkte

einen Abstand von 3 mm zueinander haben (A_Zipperling 2019). Das Punktemuster stellt ein Optimum zwischen der Breite des Druckkopfes und der Kameraauflösung dar. Es werden, wie in Abbildung 5-11 a) und b) ersichtlich, zwei Punktemuster gedruckt. Ein Muster liegt mit der gesamten Fläche auf den beschichteten Bereich, dargestellt in Abbildung 5-11 b). Ein weiteres Muster wird überlappend auf den unbeschichteten Randbereich gedruckt, wodurch das Verhalten des unbeschichteten Bereichs beobachtet werden kann, siehe Abbildung 5-11 a). Das Druckmuster in Abbildung 5-11 c) ist roter Farbe und stellt eine weitere Option dar. Im Nachgang wird erläutert, warum die rote Druckfarbe bildverarbeitungstechnische Vorteile mit sich bringt.

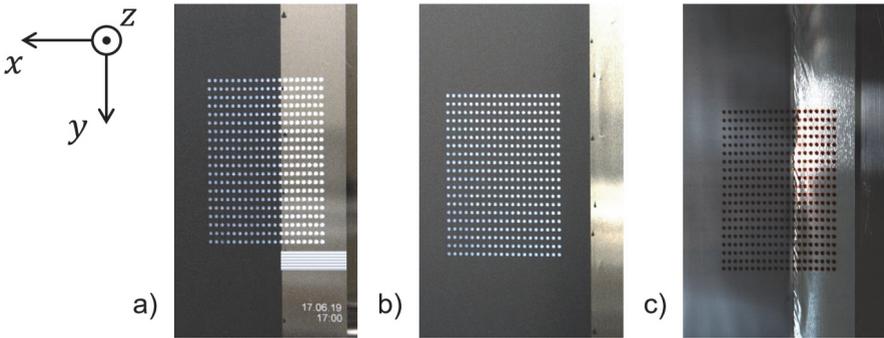


Abbildung 5-11: Druckmuster

Die Qualität des Druckmusters hängt von der Form der Punkte und dem Abstand der Punkte zueinander ab. Die Detektion der Verzerrung erfolgt durch den Vergleich des Punktemusters zwischen unkalandriertem und kalandriertem Zustand. Dadurch muss die Punktematrix nicht einem festgelegten Rechteck entsprechen. Es ist jedoch erforderlich, dass die Kreise erkannt werden, deren Mittelpunkte bestimmbar sind und keine Punkte einer Reihe in eine angrenzende Reihe hineinragen.

Die Hardware des Kamerasystems besteht aus jeweils einem Stereokamerasystem am Ein- und Auslauf des Kalenders, dargestellt in Abbildung 5-12. Verwendet werden dabei Kameras von dem Unternehmen The Imaging Source mit der Bezeichnung DFK 33UX183 mit einer USB-Schnittstelle. Die CMOS-Kamerasensoren haben eine Auflösung von 20 MP und ein Objektiv mit einer Brennweite von 50 mm. In Abbildung 5-12 ist dargestellt, dass die Kameras jeweils ein eigenes Koordinatensystem besitzen und dem Kalender ein Weltkoordinatensystem zugeordnet ist.

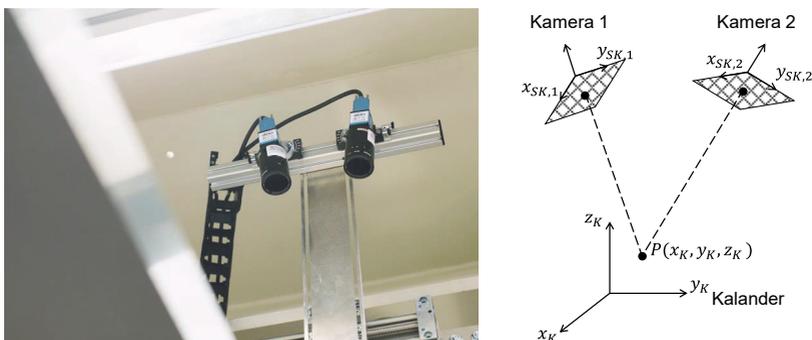


Abbildung 5-12: Stereokamerasystem

Die Voraussetzung zur Nutzung und Auswertung der Daten aus den Stereokamerasystemen ist, dass die Lage der Kameras zueinander und zum Weltkoordinatensystem bekannt ist. Das Weltkoordinatensystem stellt der Kalender dar. Zur Bestimmung der Lage der Kameras wird im Maschinenstillstand ein Schachbrettmuster mit vorgegebenen Quadratgrößen auf die Elektrode gelegt. Mit der Verschiebung und Verkippung des Schachbrettmusters wird die Lage der Kameras im Raum identifiziert und gespeichert. Über Rechenoperationen werden sowohl die Rotationsmatrix $R_{2,1}$ aus Formel 5-1, als auch die Matrizen K und $R_{n,K}$ aus Formel 5-2 berechnet. Die weiteren Berechnungen erfolgen im Koordinatensystem der Kamera 1 $X_{SK,1}$.

$$\mathbf{X}_{SK,2} = \mathbf{R}_{2,1} \cdot \mathbf{X}_{SK,1} + \mathbf{t}$$

$\mathbf{R}_{2,1}$: Rotationsmatrix von KOS Kamera 2 in KOS Kamera 1 5-1

(Süße & Rodner 2014)

$$\mathbf{X}_{SK,n} = \mathbf{K} \cdot (\mathbf{R}_{n,K} \mathbf{X}_K + \mathbf{t})$$

\mathbf{K} : Projektion von KOS Kamera n in die Bildebene 5-2

$\mathbf{R}_{n,K}$: Rotationsmatrix von KOS Kamera n in das Kalandrierte KOS

(Süße & Rodner 2014)

Die Auswertung des Punktemusters erfolgt über Matlab. Hierzu wird über das Stereokamerasystem mit jeder Kamera ein Foto im unkalandrierten wie auch kalandrierten Zustand aufgenommen, siehe Abbildung 5-13 links oben. Die Verarbeitung der Muster erfolgt ebenfalls in Matlab. Die Bildverarbeitungsschritte von den Aufnahmen bis zur Verzerrungsbestimmung sind in Abbildung 5-13 dargestellt. Im ersten Schritt müssen die gedruckten Kreise erkannt werden. Das Beschichtungsmaterial erscheint je nach Aktivmaterial und abhängig vom Leitrußanteil in den Farben Grau und Schwarz, wobei ein höherer Leitrußanteil den Schwarzanteil erhöht. Aus diesem Grund wird im ersten Schritt die Druckfarbe Weiß gewählt. Die Aufnahmen zeigen dennoch abhängig vom Beschichtungsmaterial und vor allem von den Spiegelungen der kalandrierten Elektrodenoberfläche keine stetig eindeutige Trennung der gedruckten Kreise vom Beschichtungsmaterial. Um die Kreise daher von der Beschichtungsfläche unterscheiden zu können, erfolgt die Bildverarbeitung nicht in Graustufen, sondern im Farbraum. Die gedruckten Kreise haben eine höhere Summe der R-, G- und B-Werte als die Beschichtung, sodass eine Summe als Schwellenwert zur Unterscheidung dient. Für helle Bereiche führt dies im Farbraum zu eng beieinander liegenden R-, G-, und B-Werten. Die Bildung der Differenz zwischen den einzelnen Farbwerten R, G und B ermöglicht somit eine Unterscheidung zwischen den spiegelnden und den weiß gedruckten Bereichen. Eine weitere Option ist die Verwendung von roter Druckfarbe. Der Vorteil der roten Farbe liegt in dem hohen Rotanteil im Farbraum und damit der eindeutigen Bestimmung eines R-Wertes als Schwellenwert. Für die weiteren Untersuchungen wird daher ein Druckmuster mit roter Farbe gewählt. Dadurch lassen sich die Druckmuster trotz Spiegelungen der kalandrierten Elektrode erkennen.

Die Mittelpunkte werden über eine Suchfunktion ermittelt, die Bereiche speichert, die den Farbschwellwert einer gedruckten Fläche erfüllen sowie eine definierte Größe in x- und y-Richtung aufweisen. Der Berücksichtigung von Fremdpartikeln in der Detektion der Mittelpunkte wird über eine Anforderung einer Mindestanzahl an 15 zusammenhängenden Pixeln in der direkten Umgebung entgegengewirkt. Sind die gedruckten Kreise erkannt, werden deren Mittelpunkte bestimmt. Nach der Bearbeitung und Zuordnung der Kreismittelpunkte pro Kamera erfolgt eine Durchnummerierung in jeder Aufnahme. Die nummerierten Mittelpunkte werden über Formel 5-1 und Formel 5-2 zu einer Punktwolke im Koordinatensystem der ersten Kamera transformiert.

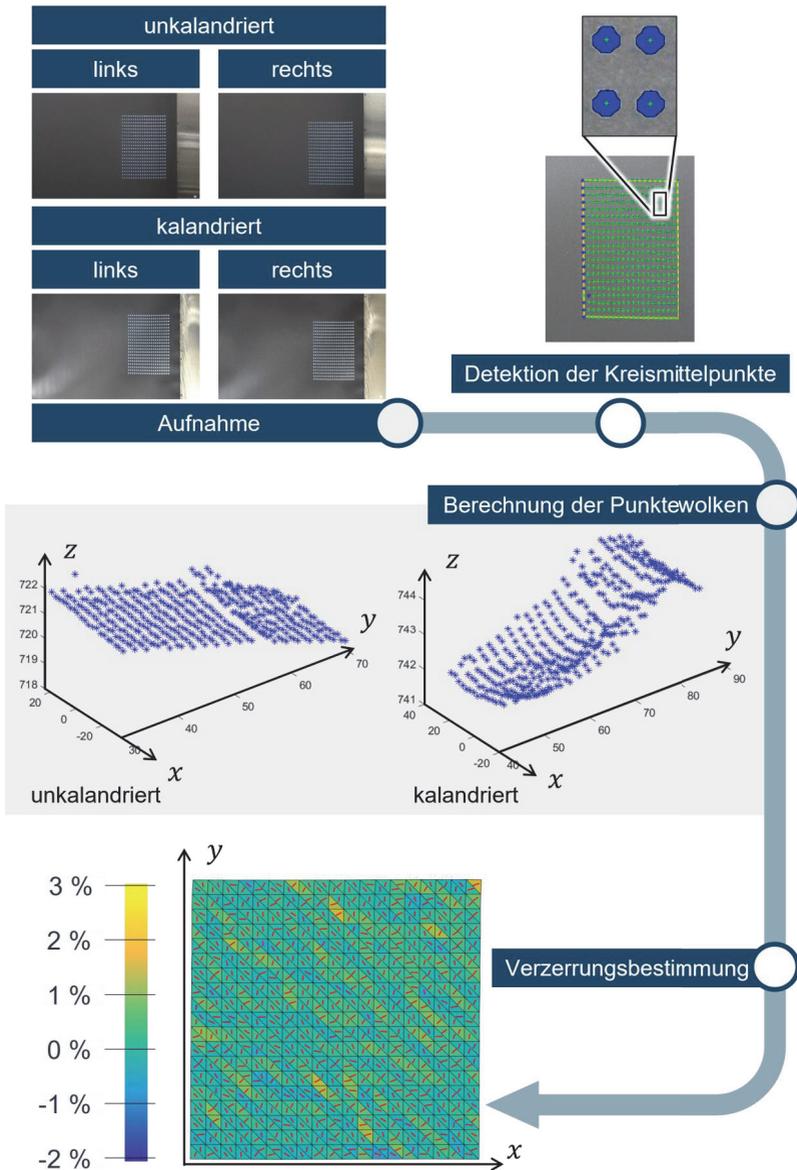


Abbildung 5-13: Verarbeitung der Aufnahmen zur Verzerrungsbestimmung

Abbildung 5-13 zeigt, eine Punktwolke im kalandrierten und im unkalandrierten Zustand. Die Punktwolken vom kalandrierten zum unkalandrierten Zustand werden verglichen, indem die Verschiebung der Punkte zueinander geprüft wird. Formel 5-3 bis Formel 5-8 aus (Altenbach 2015) stellen die Berechnung der Verschiebung der einzelnen Punkte dar, wobei die Verrechnung der Koordinatensysteme aus Formel 5-1 und Formel 5-2 inkludiert ist. Die Ortskoordinate und somit die Lage der einzelnen Druckpunkte im kalandrierten Zustand \vec{x}_{kal} entspricht der Ausgangslage \vec{x}_{unkal} addiert mit einer Verschiebung \vec{u} . Da sich die Punktwolken im dreidimensionalen Raum befinden, kann die Verschiebung \vec{u} nicht als Vektor, sondern muss als Matrix angegeben werden. Somit erfolgt über Formel 5-4 die Herleitung der Formel 5-5. Die Verzerrung der kalandrierten Elektrode wird, bezogen auf den unkalandrierten Zustand mit dem Deformationsgradienten F berechnet.

$$\vec{x}_{kal} = \vec{x}_{unkal} + \vec{u} \quad 5-3$$

\vec{x}_{unkal} : Koordinate eines Punktes im unkalandrierten Zustand

\vec{x}_{kal} : Koordinate eines Punktes im kalandrierten Zustand

$$F = \frac{\partial \vec{x}_{kal}}{\partial \vec{x}_{unkal}} = I + \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{x}_{unkal}} \quad 5-4$$

F : Deformationsgradient

I : Einheitsmatrix

$$d\vec{x}_{kal} = \frac{\partial \vec{x}_{kal}(\vec{x}_{unkal})}{\partial \vec{x}_{unkal}} d\vec{x}_{unkal} = grad(\vec{x}_{kal}) d\vec{x}_{unkal} = F \cdot d\vec{x}_{unkal} \quad 5-5$$

Der Deformationsgradient F setzt sich nach (Altenbach 2015) aus einem rotatorischen Anteil \tilde{R} und einer Verzerrung U zusammen. Somit lässt sich der Deformationsgradient in Formel 5-6 über das Produkt aus dem Rotationstensor R und dem Verzerrungstensor U abbilden. Mit der Einführung des Cauchy-Green-Deformationstensors \tilde{C} in Formel 5-7 kann in Kombination mit Formel 5-5 die Verzerrung vom unkalandrierten in den kalandrierten Zustand erfolgen. Die Werte der Verschiebung werden über die Eigenwerte des Cauchy-Green-Deformationstensors angegeben, siehe Formel 5-8. Die Verzerrungswerte werden, wie in Abbildung 5-13 abgebildet, in einer Ebene für die Punktwolke dargestellt. Zwischen drei Punkten wird dabei eine Ebene aufgespannt und der Verzerrungswert für das Dreieck angezeigt. Für jeden Punkt ist ein

Verschiebungsvektor vorhanden, aber es benötigt drei Vektoren, um eine Verzerrung im Dreidimensionalen zu berechnen. Damit ist die Verzerrung für die Elektrode im bedruckten Bereich bekannt.

$$F = \tilde{R} \cdot U \tag{5-6}$$

\tilde{R} : Rotationstensor

U : Verzerrungstensor

$$F^T F = (\tilde{R}U)^T \tilde{R}U = U^T \tilde{R}^T \tilde{R}U = U^T U = U^2 = \tilde{C} \tag{5-7}$$

\tilde{C} : Cauchy-Green-Deformationstensor

$$\lambda = \frac{\overline{x_{kal}}}{x_{unkal}} \text{ mit Eigenwerten } (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \text{ von } \tilde{C} \tag{5-8}$$

Zusammenfassend ist ein Gesamtsystem integriert, das aus den Teilsystemen Drucksystem und zwei Stereokamerasysteme am Kalandrier besteht. Dieses bietet die Möglichkeit über ein aufgebrachtes Druckmuster den Verzerrungsunterschied vom unkalandrierten zum kalandrierten Zustand zu quantifizieren.

Eine Herausforderung für die Verzerrungsdetektion stellt die poröse Struktur der Beschichtung dar. Ein einmaliges Drucken ist nicht ausreichend, um das Muster zu erkennen. Aus diesem Grund ist eine Mehrfachbedruckung notwendig. Die Drucktinte für das Inkjet-Verfahren besteht aus dem Lösungsmittel Isopropanol und den Farbpartikel aus Titandioxid. Die Farbpartikel haben eine Partikelgröße von < 1 µm und sind in Abbildung 5-14 im grünen Bereich markiert. Aufgrund der Größenunterschiede von < 1 µm der Farbpartikel zu 10 µm für ein Aktivmaterialpartikel, wird der Einfluss der Druckpunkte auf die Verdichtung der Beschichtung unter Berücksichtigung der gesamten Elektrodenbreite vernachlässigt.

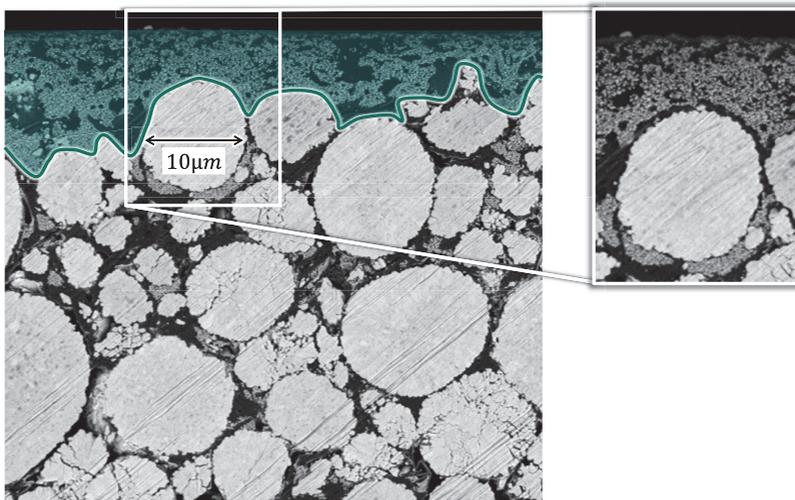


Abbildung 5-14: REM-Aufnahme eines gedruckten Punktes im Querschnitt einer kalandrierten Elektrode

Eine weitere technische Herausforderung stellt eine ungünstige Kombination aus Verschmutzung der Kalandrierwalze, Anhäufung von Drucktinte und Restfeuchte des Lösungsmittels des Druckmediums dar, da dies zum Ablösen der Punkte und Anhaften an den Kalandrierwalzen führen kann, siehe Abbildung 5-15 a). In diesem Fall ist eine Punkteerkennung nicht mehr möglich. Die gesamte Punktematrix wird unter Ausschluss der fehlenden Punkte aber dennoch erkannt und eine Punktwolke wird erstellt. Hierbei werden fiktive Punkte, in Blau in Abbildung 5-15 b), in die Punktematrix gelegt, indem über die Eckpunkte des Punktemusters ein Rechteck aufgespannt wird und die Sollpositionen der fehlenden Punkte berechnet werden. Diese dienen der fehlerfreien Durchführung des Bildverarbeitungs-codes und werden nicht in die Verzerrungsberechnung miteingeschlossen. Fehlt dieser Stützpunkt, kann die Punkteerkennung und damit die Bestimmung der Punktwolken nicht durchgeführt werden.

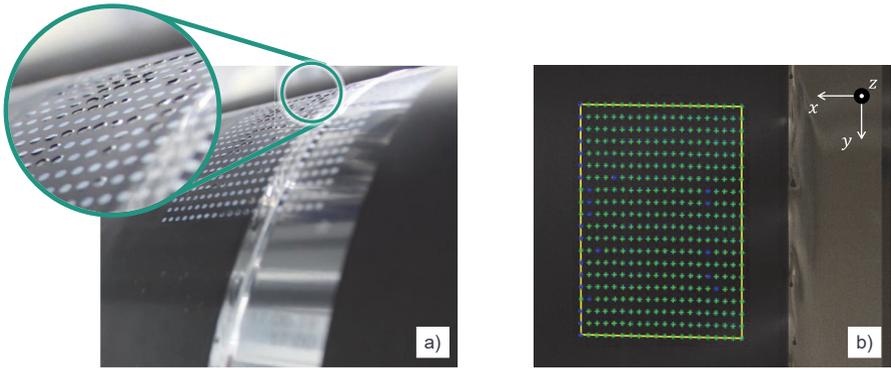


Abbildung 5-15: Fiktive berechnete Punkte als Hilfsmaßnahme für fehlende Druckpunkte

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Verzerrungsdetektion werden zwei Musterplatten angefertigt, siehe Abbildung 5-16 a) und b). Diese besitzen, wie das gedruckte Muster, ein Punktemuster mit 20 mal 20 Punkten. Die erste Schablone, Abbildung 5-16 a), hat konstante Abstände zwischen den einzelnen Punkten. Bei der zweiten Schablone, Abbildung 5-16 b), ist das Muster in vier Segmente untergliedert, wobei pro Segment eine Verzerrung vorgegeben ist. Tabelle 5-10 zeigt die Verzerrung in x- und y-Richtung, wie es für das Bauteil festgelegt wurde, welchen Wert die Messung ergibt und wie hoch die Differenz dazu ist. Die Schaubilder in Abbildung 5-16 c) und d) visualisieren die Verschiebung in x-Richtung und y-Richtung. Die Differenz ist bei der Auswertung der Ergebnisse zu beachten und gibt die messbare Genauigkeit an.

Tabelle 5-10: Genauigkeitsmessung der Verzerrungsmessung

	Vorgegebene Verzerrung [%]	Gemessene Verzerrung [%]	Differenz [%]
Bereich 1	$\epsilon_x = 5.03$	$\epsilon_x = 4.87$	$\Delta\epsilon_x = -0.16$
Bereich 2	$\epsilon_y = -6.66$	$\epsilon_y = -6.67$	$\Delta\epsilon_y = -0.01$
Bereich 3	$\epsilon_x = -9.688$	$\epsilon_x = -9.78$	$\Delta\epsilon_x = -0.182$
Bereich 4	$\epsilon_y = -17.463$	$\epsilon_y = -17.66$	$\Delta\epsilon_y = -0.197$

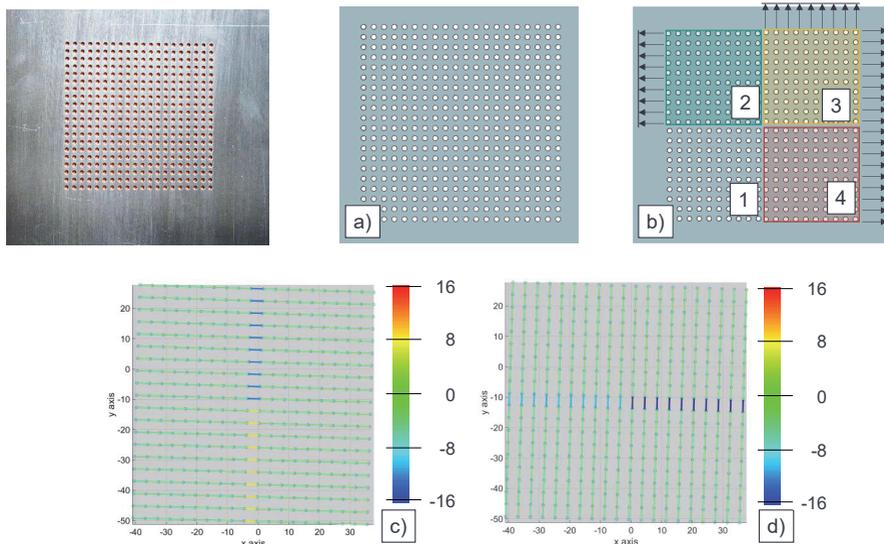


Abbildung 5-16: Konzept zur Überprüfung der Messgenauigkeit der Verzerrungsmessung

Wie in Tabelle 5-8 und in Kapitel 5.1. beschrieben, wird zur Verzerrungsmessung ein weiteres Messsystem verwendet. Das eigens aufgebaute System aus Stereokamera, Druckkopf und Auswertung hat die Festanforderung inline agieren zu können. Daraus resultiert eine starre Position der Kameras, ein kleines Druckfeld und ein geringer Berechnungsaufwand. Im Vergleich dazu bietet das GOM-System die Aufnahme der Verzerrung sowohl über die gesamte Elektrodenbreite wie auch über eine längere Distanz. Allerdings sind die Probenvorbereitung und die Datenauswertung aufgrund der Bearbeitungsdauer nicht inlinefähig. Das Verfahren wird in jedem Experiment angewendet.

Das GOM-System besteht aus einem optischen Sensor mit der Bezeichnung GOM ATOS Core 135 und einem PC mit der zugehörigen Software GOM Inspect. Es handelt sich dabei um ein in einem Gehäuse befindlichen fest verbauten Stereokamerasystem, mit einem Messbereich von 135 mm x 100 mm. Die Auflösung pro Kamera beträgt 5 MP. Die hohe Auflösung, gekoppelt mit einem Linienprojektor, lässt die Aufnahme eines dreidimensionalen Höhenprofils zu, sodass zusätzlich zur

Verzerrungsdetektion auch die geometrische Ausprägung der Elektrode beurteilbar ist. Eine Aufnahme der einzelnen Wrinkles ist bei dieser Auflösung jedoch nicht möglich.

Die Versuchsvorbereitung sieht ebenso das Aufbringen von Farbe auf die Elektrode vor. Hierbei wird manuell mit einem Farbspray ein zufälliges Muster aufgebracht, siehe Abbildung 5-17. Die Anforderungen an das Muster können nicht als Festanforderungen definiert werden. Der Kontrast zwischen hellen und dunklen Flächen muss ein gewisses Verhältnis überschreiten. Es ist erforderlich, dass das Muster eine gut erkennbare Vielfalt an Grauwerten aufweist. Die Aufnahme wird im unkalandrierten Zustand in sogenannte Facetten aufgeteilt und daraus wird ein Grauwertmuster für die Aufnahme gespeichert, dargestellt in Abbildung 5-17. Die individuellen Muster werden in einer erneuten kalandrierten Aufnahme automatisiert über die Software gesucht. Über die Veränderung der Facetten lässt sich die Verzerrungen berechnen.

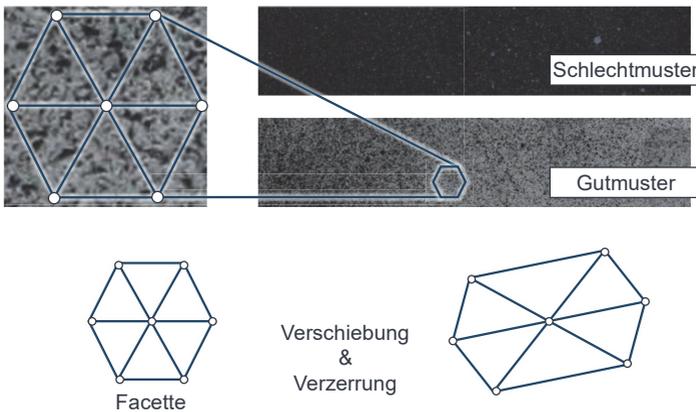


Abbildung 5-17: Muster für die Verzerrungsdetektion mit GOM

Auch für die Anwendung des GOM-Systems darf das zu untersuchende Objekt keine Spiegelungen aufweisen. Damit sind die Eigenschaften der Oberfläche einer kalandrierten Elektrode und der unbeschichteten Randbereiche herausfordernd. Der unbeschichtete Bereich wird daher im Vorfeld mit mattschwarzer Farbe besprüht, damit ähnliche optische Eigenschaften wie bei der Beschichtung vorliegen. Der Einfluss spiegelnder Oberflächen der kalandrierten Elektrode auf die Aufnahme kann durch die Veränderung des Aufnahmewinkels beeinflusst werden.

Ebenso wie beim gedruckten Muster führt das Aufsprühen von Farbe bei aufgeheizten Walzen zu einem Ablösen der Beschichtung und einem Festkleben an den Kalandervälzen. Notwendig ist daher eine ausreichende Wartezeit zwischen dem Aufbringen des Sprühmusters und dem Kalandriervorgang mit anschließender Aufnahme einzuhalten. Eine weitere Herausforderung ist, dass das System nicht stationär installiert ist, sondern die Kamera sich auf einem portablen Stativ befindet. Abbildung 5-18 zeigt den Einfluss der Bewegung des Systems von der Position der unkalandrierten zur kalandrierten Aufnahme. Das Messsystem muss dabei vom Kalandereinlauf zum Kalanderauslauf gebracht werden. Die Elektrode ist für die Testmessung aus Abbildung 5-18 nicht kalandriert, sondern lediglich an der Anlage verfahren. In x-Richtung sind Abweichungen um 0,0 % mit einer Amplitude von ungefähr 0,2 % Dehnung zu erkennen. Für die y-Richtung beträgt die Schwankung ungefähr 0,4 % Dehnung um 0,0 %. Das Grundrauschen ist eine Orientierung für den Grenzwert, ab welchem die Messungen eine tatsächliche Verzerrung vorweisen.

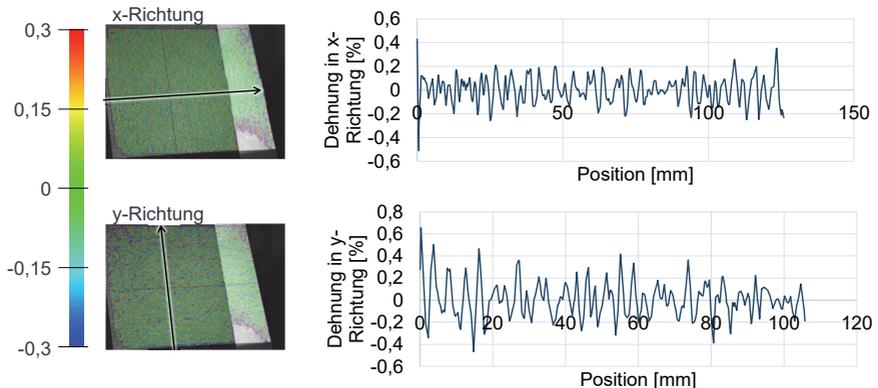


Abbildung 5-18: Verzerrungsmessung durch Bewegung des Systems

Die Verzerrungsmessung über das GOM-System stellt bezogen auf die Handhabung mit dem Kamerasystem wie auch bezogen auf die Farbaufbringung keine Inline-Lösung dar. Im Gegensatz zur eigenen Lösung besitzt es den Vorteil großflächiger Aufnahmen und die Möglichkeit der Beurteilung der geometrischen Veränderung des Materials. Aufgrund der Installation der Hardware, der Musteraufbringung und der Aufnahme innerhalb der Kalandieranlage eignet sich die eigene Lösung für eine Inline-Anwendung. Im Vergleich zu GOM ist das Aufnahmegebiet jedoch kleiner.

5.3 Winkle-Detektion

Die Winkle-Bildung beruht auf dem Verzerrungsunterschied zwischen dem unbeschichteten und dem beschichteten Bereich, wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Zur Bildung des Prozessverständnisses muss diesbezüglich eine Ausprägung der Winkles beschrieben werden können. Die Winkles haben das Erscheinungsbild einer Falte und können daher über die geometrischen Größen Länge, Höhe und Winkel zur Beschichtungskante beschrieben werden, wie in Abbildung 5-19 dargestellt.

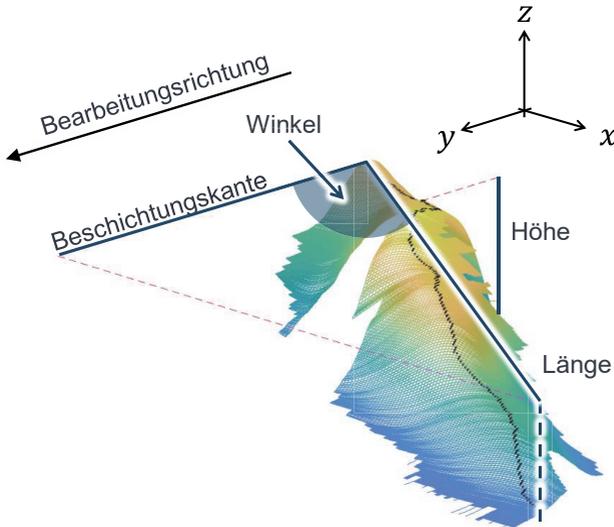


Abbildung 5-19: Geometrische Beschreibung eines Winkles

Ein Linienlasersensor ermöglicht die Aufnahme einer dreidimensionalen Oberfläche des Randbereichs. Kameras ermöglichen die Auswertung im zweidimensionalen Bereich. Der Linienlasersensor scannt mit einer Linienbreite von 60 mm die laufende Elektrode im Randbereich am Zugwerk ab. Die Elektrode rollt dabei auf der Umlenkwalze ab, sodass Wellen in der Elektrode oder ein Schwingen der Elektrodenbahn keine Störgröße darstellen. Damit ist der Sensor in der Anlage integrierbar und bezüglich der Datenaufzeichnung inliniefähig. Die Datenverarbeitung von 10.000 Aufnahmeprofilen hintereinander benötigt jedoch eine lange Bearbeitungsdauer. Aus diesem

Grund steht zum Vergleich eine Kamera des bereits verwendeten Stereokamerasystems zur Wrinkle-Aufnahme zur Verfügung. Der Nachteil einer Kamera ist allerdings die fehlende dritte Dimension zur Bestimmung der Wrinkle-Höhe. Von Vorteil ist hier die kürzere Datenverarbeitungsdauer. Das Stereokamerasystem an sich kann für die Wrinkle-Aufnahme und für die Auswertung im Dreidimensionalen nicht benutzt werden, da dazu die Auflösung zu gering ist. Die Verortung der Systeme an der Kalandieranlage ist in Abbildung 5-20 veranschaulicht. Zusätzlich befindet sich eine Kamera in der Nähe des Linienlasersensors. Der Einsatz der weiteren Kamera kombiniert den Vorteil des Messortes des Linienlasers aufgrund der stabil laufenden Elektrodenbahn mit der effizienteren Bildauswertung des Kamerasystems.

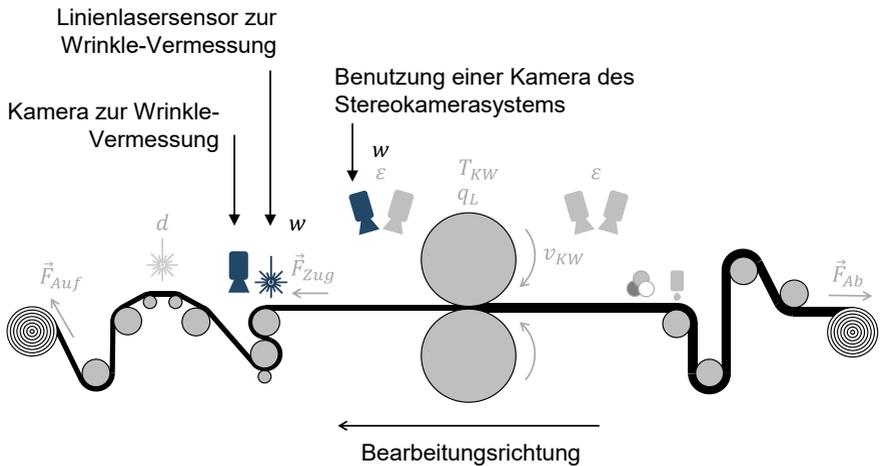


Abbildung 5-20: Systeme zur Wrinkle-Detektion

Die Rohdaten des Linienlasersensors entsprechen einer Auflistung von Höhenprofilen quer zur Bearbeitungsrichtung. Abbildung 5-21 zeigt eine Übersicht über die Verarbeitung der Daten, die in (A_Ströbel 2019) entwickelt wurde. Die Höhenprofile werden mit einer festgelegten Frequenz aufgenommen. Durch die bekannte Bearbeitungsgeschwindigkeit am Kalandrier, ist die aufgenommene Fläche berechenbar. Vor der eigentlichen Wrinkle-Auswertung ist es erforderlich, dass die Beschichtungskante über den Höhenunterschied zum unbeschichteten Bereich in der Aufnahme bestimmt wird. Die Beschichtungskante stellt den Startpunkt der Wrinkles dar, vergleiche Abbildung 5-19.

Allein der beschichtungsfreie Bereich wird zur Wrinkle-Detektion herangezogen. Der erste Schritt in der Datenverarbeitung der Wrinkle-Auswertung filtert über definierte Eigenschaften potenzielle Positionen der Wrinkles. Beachtet werden dabei Höhenunterschiede und Steigungen zu benachbarten Bereichen, wie auch die Ausrichtung von zusammenhängenden Bereichen potenzieller Wrinkles. Sind die Höhenunterschiede sowie deren Ableitungen hoch genug, so wird an der höchsten Stelle ein Punkt gesetzt, vergleiche Abbildung 5-21 „Mustererkennung“. Das Aneinanderreihen der detektierten Pixel ergibt den Verlauf eines Wrinkles. Erforderlich sind zusätzlich Operatoren, um Messfehler auszuschließen. Hierzu gehören sowohl Spiegelungen, die sich durch sehr hohe oder durch fehlende Messwerte identifizieren lassen, als auch Fremdpartikel, die als einzelnen Pixel die Bedingungen erfüllen. Wrinkle-Verläufe, die keinen stetigen Verlauf haben, sondern beispielweise eine Richtungsänderung aufzeigen, werden ebenso aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Des Weiteren erkennt die Detektion die Längsfalten, siehe Abbildung 3-9, welche über eine Winkelbedingung zur Beschichtungskante differenzierbar sind.

Sind die Positionen der Wrinkles bekannt, wird deren Verlauf bestimmt und eine Gerade für jeden Wrinkle festgelegt. Die Gerade verläuft durch den Startpunkt und durch den Endpunkt eines detektierten Wrinkles. Anhand der Gerade erfolgt die Berechnung der beschriebenen Größen Länge, Winkel und Höhe. Die Länge und der Winkel des Wrinkles sind in der zweidimensionalen Ebene bestimmbar. Die Höhe erfordert die Informationen aus dem dreidimensionalen Raum. Diese wird durch die Bestimmung der tiefsten Stellen zwischen zwei Wrinkles zur höchsten Stelle des Wrinkles ausgewertet.

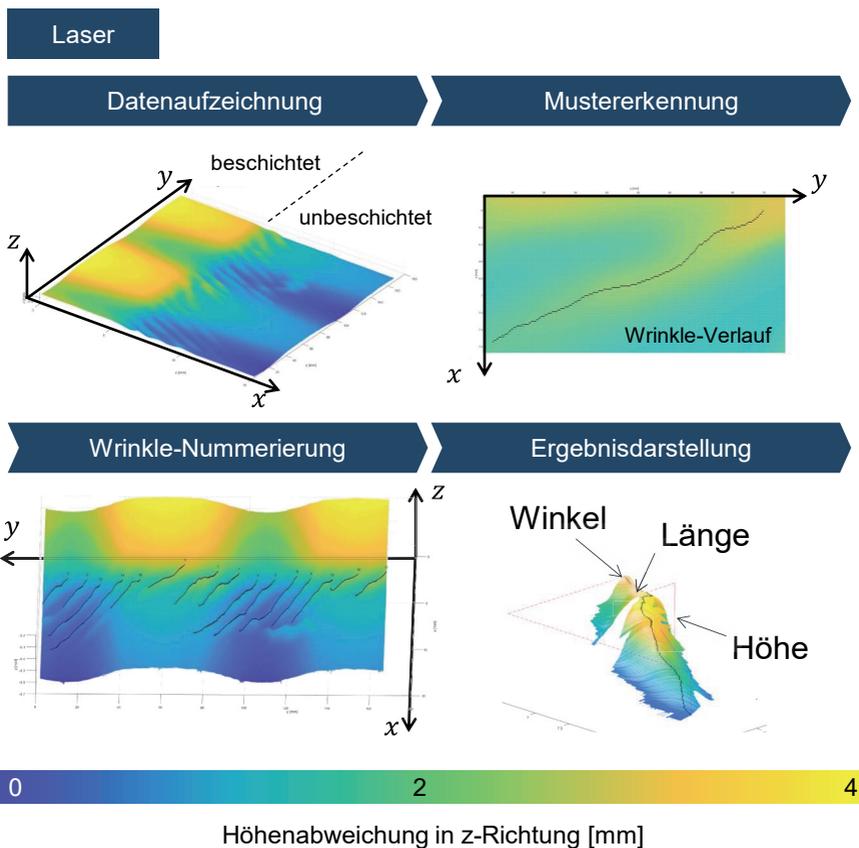


Abbildung 5-21: Datengewinnung mit Hilfe des Lasersensors

Wie oben beschrieben, erfolgt die Aufnahme des Linienlasersensors mit einer festgelegten Frequenz, da die Bahngeschwindigkeit bekannt ist. Die Standardabweichung der Kalandriergeschwindigkeit von 0,02 m/min aus Abbildung 5-6 führt zu einer Abweichung von 0,1 mm bezogen auf die Höhe, Länge und Breite der Winkles.

Eine weitere Alternative zur Wrinkle-Erkennung stellt eine zweidimensionale Kameraaufnahme dar. Um den zu untersuchenden Bereich (ROI) dabei festzulegen, ist der beschichtete Bereich vom unbeschichteten Bereich bildverarbeitungstechnisch zu trennen. Aufgrund der Spiegelungen der kalandrierten Elektrode ist dies jedoch über einen Schwellenwert als Grauwert nicht möglich. Hierbei ist in (A_Ströbel 2019) eine Abhilfe erarbeitet, die mithilfe der Farbwerte aus dem RGB-Raum einen Grenzwert definieren lässt. Die Bedingung hierbei ist, dass die einzelnen Farbwerte im beschichteten Bereich nicht weit voneinander entfernt liegen dürfen. Im Vergleich dazu sind im unbeschichteten Bereich aufgrund von Reflexion und Streuung des Lichts einzelne Farbwerte gut voneinander zu unterscheiden. Formel 5-9 zeigt die dazugehörige Verrechnung der einzelnen R-, G- und B-Werte. In Abbildung 5-22 ist dazu eine Linie im RGB-Raum dargestellt, auf der sich die Grauwerte aus Formel 5-9 befinden. Die Ausschnitte der Aufnahmen in Abbildung 5-22 zeigen, dass der beschichtete Bereich einen monotonen Grauwert aufweist. Der Kollektor gibt im Gegensatz dazu keinen einheitlichen Grauwert ab, sondern reflektiert aufgrund der glatten Oberfläche das gesamte Farbspektrum. Damit liegen für den beschichteten Bereich die geringen R-, G- und B-Werte nahe der Farbe Schwarz im RGB-Raum zusammen. Der Kollektor liegt aufgrund der starken Reflexion mit hohen R-, G- und B-Werten nahe der Farbe Weiß im RGB-Raum zusammen. Die Methode ist im Vergleich zu einem Schwellenwert im Graubereich über ein Schwarz-Weiß Foto robuster, sodass die Beschichtung zum Kollektor in der Bildverarbeitung gut trennbar ist.

$$\begin{aligned}
 RGBSum(i, j) &= (R(i, j) - G(i, j))^2 + (R(i, j) - B(i, j))^2 \\
 &+ (B(i, j) - G(i, j))^2
 \end{aligned}
 \tag{5-9}$$

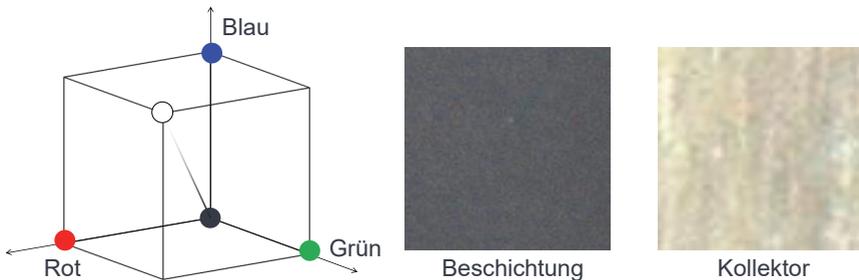


Abbildung 5-22: Grenzwerterkennung zur Beschichtungserkennung

Die Bildverarbeitung zur Wrinkle-Detektion ist in Abbildung 5-23 dargestellt. Die Aufnahme zeigt die Elektrode von oben unmittelbar nach dem Kalandrieren am Kalanderauslauf. Als ersten Schritt in der Bildverarbeitung muss der interessante Bereich – ROI (Region of Interest) bestimmt werden. Dazu wird nach Formel 5-9 die Aufnahme verarbeitet, sodass der beschichtete Bereich vom unbeschichteten Bereich unterschieden werden kann. Zusätzlich zur Farbbedingung, erfolgt die Bestimmung des beschichteten Bereichs über die geometrische Randbedingung, dass es sich dabei um ein Rechteck handeln muss. Damit ist die Beschichtungskante bekannt. Ein Rechteck im unbeschichteten Bereich wird von der Beschichtungskante aus mit einer vorgegebenen Pixelzahl festgelegt. In diesem Bereich erfolgt durch Operationen die Lageerkennung der Wrinkles. Markiert werden Pixel, welche Schwellen und Gradienten im Grauwertbereich erfüllen. Die Pixel, die die Anforderungen erfüllen und eine Einheit bilden, werden auf deren Verlauf geprüft. Die Bestimmung der Länge und des Winkels der Wrinkles erfolgt gleichermaßen wie für die Auswertung der Laserdaten. Für die Fotoaufnahmen werden über die Bestimmung des Lichteinfalls und des Schattenwurfs der Wrinkles deren jeweilige Höhen bestimmt (A_Ströbel 2019).

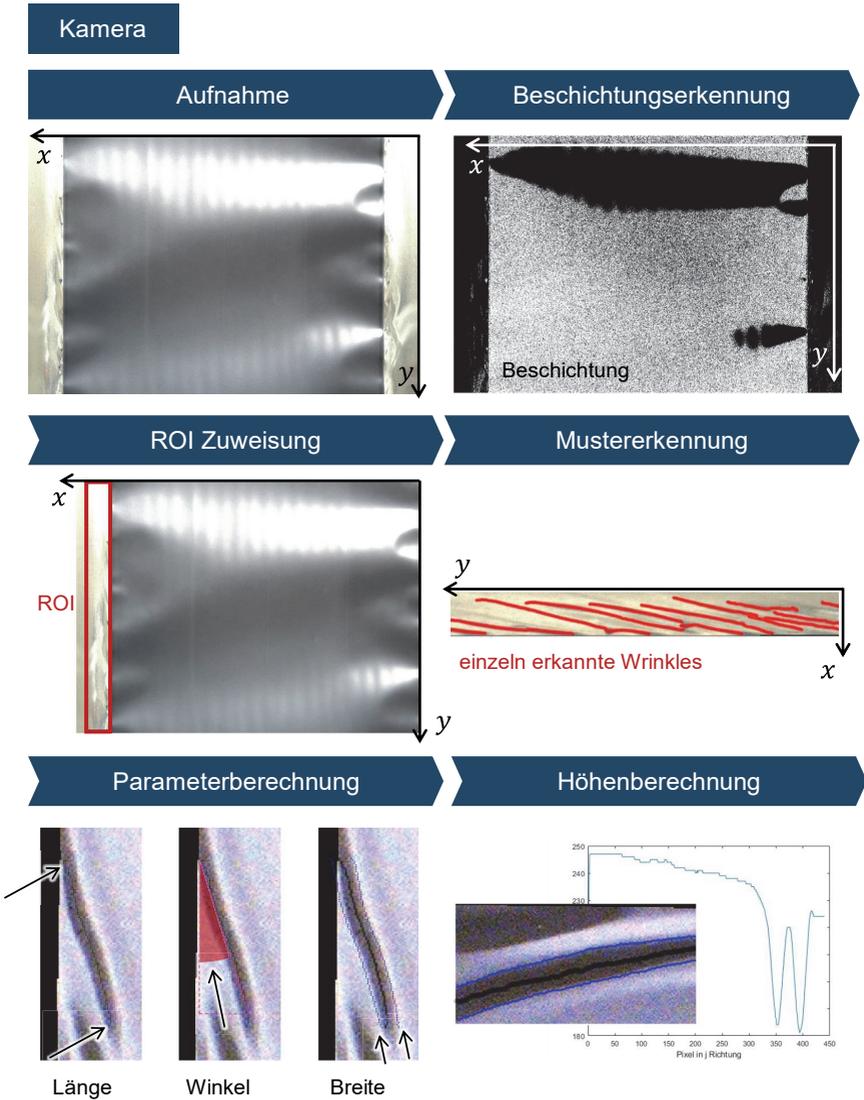


Abbildung 5-23: Übersicht der Datenaufnahme mit Hilfe der Kamera und deren Verarbeitung

Wie zu Beginn in Kapitel 5.3 erwähnt, wird eine weitere Kamera zur Wrinkle-Detektion am Kalanderauslauf an die Position des Linienlasersensors angebracht und sitzt am Zugwerk über der Elektrodenbahn. Die Kamera kombiniert die Vorteile der Position des Linienlasersensors mit der kürzeren Rechendauer in der Bildverarbeitung. Es wird eine Kamera des Herstellers IDS Imaging Development Systems GmbH mit der Bezeichnung U3-3890SE-C-HQ verwendet. Die Kamera hat einen Farbsensor mit einer Auflösung von 12 MP und einer maximalen Aufnahmefrequenz von 33 fps. Die Hardware wird durch ein Gehäuse vom Umgebungslicht abgeschottet. Durch eine Ringleuchte werden die Lichtstörquellen aus der Umgebung beseitigt. Ein Blick in das geschlossene Kameragehäuse sowie eine Beispielaufnahme sind in Abbildung 5-24 dargestellt.

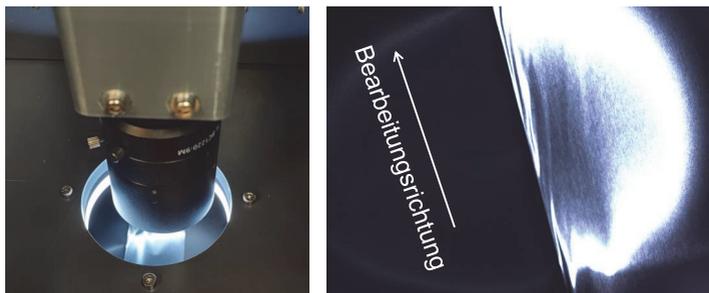


Abbildung 5-24: Kamera und Aufnahme zur Wrinkle-Detektion mit KI-Methoden

Zusätzlich zur Hardware gibt es eine softwareseitige Erweiterung zur Bestimmung der Lage der Wrinkles. Deren Zuverlässigkeit soll durch den Einsatz von Methoden aus dem Bereich Künstliche Intelligenz (KI) erhöht werden. Die Künstliche Intelligenz beschreibt unter anderem sogenannte neuronale Netze, wobei es sich um Algorithmen handelt. Neuronale Netze haben die Fähigkeit, eigenständig Verbesserungen im Verarbeitungscodex vorzunehmen (Kreutzer & Sirrenberg 2019). Neuronale Netze verarbeiten Informationen durch spezielle Funktionen und Verknüpfungen der Neuronen untereinander (Kreutzer & Sirrenberg 2019). Deep Learning beschreibt das Verarbeiten großer Datenmengen auf mehreren Schichten des neuronalen Netzes. Für die Bildverarbeitung werden dabei verschiedene Eigenschaften und deren Kombination geprüft, um Merkmale eines Wrinkles wiederzuerkennen. Im Training der neuronalen Netze werden die Parameter der Neuronen an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst.

Das in dieser Arbeit verwendete neuronale Netz trägt die Bezeichnung FASTER R-CNN (A_Tran 2020). Aufnahmen einer Kamera werden durch die Anwendung des Netzes CNN nicht nur als Menge von Pixeln beschrieben, sondern auch als Menge von primitiven Formen, Mustern oder Objekten. Das Prinzip beruht dabei auf diskreten Faltungen mit gelernten Filtern. Die Methode R-CNN wird mit einem Sliding-Window-Detektor ergänzt, der über eine feste Größe Merkmale in den Aufnahmen untersucht, sodass Objekte gesucht und erkannt werden können. Die FASTER R-CNN Methode ermöglicht im Vergleich zur R-CNN Methode eine höhere Auflösung. Zudem werden kürzere Trainings- und Verarbeitungszeiten benötigt. Die Effektivität wird erhöht, indem die gesamte Aufnahme als Eingangsgröße dient und Objekte zur Erkennung vorgegeben werden. Die Erweiterung zu FASTER R-CNN Methode beinhaltet ein weiteres neuronales Netz zur Eingrenzung des ROIs für die Objekterkennung.

Der erste Schritt sieht das Training des neuronalen Netzes vor. Dabei werden Aufnahmen von Wrinkles eingespielt, wie auch explizite Änderungen der Wrinkle-Aufnahme. Diese Änderungen sehen Spiegelungen, Drehungen und Veränderungen im Kontrast vor, sodass die Wrinkles in unterschiedlichen Situationen erkannt werden können. Nach dem Training ist das neuronale Netz einsatzbereit. Das Ergebnis der Anwendung des neuronalen Netzes zur Wrinkle-Erkennung sind die Bereiche, in denen sich die Wrinkles befinden. Nach der Bestimmung der Lage der Wrinkles, wird die Bildverarbeitung wie bereits beschrieben fortgesetzt und Länge, Winkel und Höhe bestimmt.

Bei den genannten Methoden zur Wrinkle-Detektion und Quantifizierung der Wrinkle-Größen unterscheidet sich der Linienlasersensor von den Kamerasystemen durch eine höhere Auflösung, aber auch durch eine größere Datenmenge. Insbesondere die Höhe eines Wrinkles lässt sich mit dem Linienlasersensor mit einer höheren Auflösung als beim Kamerasystem aufnehmen. Die Auswertung der Kameraaufnahmen ist diesbezüglich stark vom Umgebungslicht abhängig. Allgemein ist die Wrinkle-Auswertung mit der Kamera des Stereokamerasystems durch die unterschiedlichen Lichtverhältnisse und Materialsiegelungen nicht durchgehend gewährleistet. Die „KI-Kamera“ bewährt sich vor allem für wechselnde Prozessgrößen und Materialien, sodass die auftretenden Wrinkles auch unter unbekanntem Rahmenbedingungen erkannt werden können. Daher eignet sich die Kamera mit der KI-Anwendung am besten zum Inline-Einsatz, wobei der Linienlasersensor für eine detaillierte Auswertung heranzuziehen ist.

5.4 Versuchsplanung am Standardkalandrierprozess

Die Beschreibung der Vorgehensweise in Kapitel 5.1 und die Systeme aus den Kapiteln 5.2 und 5.3 sind ein Gewinn für das Prozessverständnis, wobei dies lediglich in Kombination mit einer effizienten Versuchsplanung zu maximaler Aussagekraft führt.

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, steht die Variation der Elektrodendichte nicht im Fokus. Auch weitere Materialparameter werden nicht systematisch in den Versuchsplänen variiert. Unterschiedliche Dichten werden vereinzelt angefahren, um die Auswirkung der Zieldichte auf die Wrinkle-Bildung darzustellen. Ein Kompromiss zwischen der Wrinkle-Ausprägung und der Zieldichte stellt keine Option dar, da zu den für die Batteriezelle optimalen Bedingungen kalandriert werden soll. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, entspricht die Elektrodendichte einem Haupteinflussfaktor für die Batteriezellkapazität. Es gilt für eine Zieldichte den Prozess im Detail zu verstehen sowie die Zusammenhänge zwischen der Wrinkle-Bildung und den Prozessparametern herauszuarbeiten.

Auf der Anlagenseite werden die Kalandriergeschwindigkeit, der Bahnzug sowie die Kalendarwalzentemperatur variiert. Die Geschwindigkeit kann bis auf die erste Nachkommastelle in m/min eingegeben werden. Hierbei ist ein Bereich von 1 m/min bis 30 m/min einstellbar. Der Bahnzug ist am Abwickler, am Zugwerk und am Aufwickler in 1 N Schritten einstellbar. Für die Versuche wird der Bahnzug am Zugwerk innerhalb eines möglichen Bereichs von 1 N bis 100 N variiert. Die Kalendarwalzentemperatur erlaubt ein Aufheizen der Kalendarwalzen, sodass eine Einstellung von der aktuellen Raumtemperatur bis 90°C in 1°C Schritten möglich ist.

Die angegebenen Prozessparameter, deren Wertebereiche sowie die Intervalle zur Wertewahl zeigen auf, dass ein vollfaktorieller Versuchsplan zu über 8 Mio. Versuchen führen würde. Eine reduzierte Wahl der Intervalle mit 5 m/min, 10 N und 10°C würde zu insgesamt 1920 Versuchen führen. Mit einer Versuchsdauer von 2 Tagen, inklusive Vor- und Nachbereitung, jedoch ohne eine Auswertung, zeigt sich, dass die Versuchsgestaltung auf einem statistischen Versuchsplan beruhen muss.

Die Randbedingung, dass die Anlagenparameter bis zu den maximal möglichen Grenzen gewählt und nicht lineare Zusammenhänge erwartet werden, grenzen die Auswahl an möglichen Versuchsplänen ein.

Tabelle 5-11 gibt eine Übersicht über ausgewählte statistische Versuchspläne und den Vergleich mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan. Die Wahl aus der großen Vielfalt an Versuchsplänen hängt davon ab, wie viele Parameter in eine Analyse eingeschlossen werden sollen, welche Stufen notwendig und welche Zusammenhänge aus den Ergebnissen zu erwarten sind (Kleppmann 2013). Auszuschließen sind hierbei nicht nur der vollfaktorielle Versuchsplan, sondern auch der zweistufige Versuchsplan sowie ein Vorgehen nach Plackett-Burmann. Ein Plackett-Burmann-Versuchsplan ist für eine große Parameteranzahl in zweistufiger Weise vorgesehen, um wichtige Faktoren für weitere Versuche zu ermitteln. Dessen Ergebnisse lassen aber nur lineare Zusammenhänge darstellen. Lineare Zusammenhänge sind mit der Darstellung der grundlegenden Parameterabhängigkeiten und den Wirkzusammenhängen aus Kapitel 3.5 nicht zu erwarten. Eine Untersuchungsstrategie nach CCD (Central Composite Design) erwartet Versuche außerhalb der Parameterräume. Die Versuchsgrößen entsprechen Anlagenparametern, die wertemäßig begrenzt sind und nicht über die Anlagengrenzen betrieben werden können. Daher kommt auch die Versuchsplanung nach CCD nicht infrage. Das BBD (Box Behnken Design) sieht zwar eine Verteilung der Versuchsparameter ähnlich dem CCD vor, bleibt jedoch innerhalb der Parametergrenzen. Die erste Versuchsreihe wird somit im Box Behnken Design angelegt. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 5-25 die vorgestellten Versuchspläne CCD und BBD, wobei die Kugeln die einzelnen Versuche darstellen. Die Achsen stellen die jeweiligen Versuchsparameter dar.

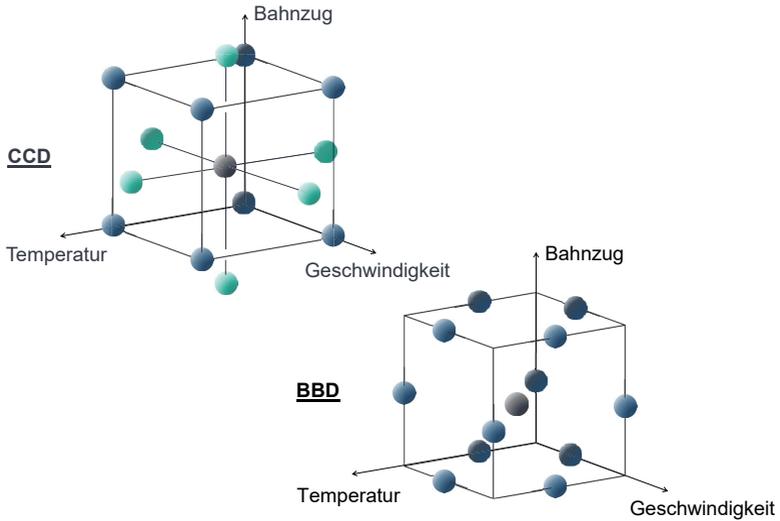


Abbildung 5-25: Darstellung der Versuchspläne CCD und BBD

Tabelle 5-11: Übersicht über Versuchspläne (in Anlehnung an (A_Denk 2019))

Merkmale	Vollfaktoriell	Zweistufig faktoriell	Plackett-Burmann	CCD	BBD
Linearität	+	+	+	+	+
Nicht Linearität	+	-	-	+	+
Aufwand	-	+	+	-	+
Wechselwirkungen	+	+	-	+	+
Einschränkungen	-	nicht linear	nicht linear	-	0

In der ersten Versuchsreihe werden alle drei Anlagenparameter systematisch variiert, dargestellt in Tabelle 5-12. Verwendet wird das Kathodenmaterial mit den Aktivmaterialpartikeln NMC 622 mit der geringen Beladung von 17,6 g/cm³. Die jeweiligen Versuche werden gemäß der in Tabelle 5-1 aufgeführten Arbeitsschritte durchgeführt und dokumentiert.

Tabelle 5-12: Übersicht über den Versuchsplan 1 (A_Denk 2019)

Versuchsnummer	Geschwindigkeit [m/min]	Walzentemperatur [°C]	Bahnzug [N]
1	1	55	0
2	1	55	100
3	30	55	0
4	30	55	100
5	15,5	20	0
6	15,5	20	100
7	15,5	90	0
8	15,5	90	100
9	1	20	50
10	30	20	50
11	1	90	50
12	30	90	50
13	15,5	55	50
14	15,5	55	50
15	15,5	55	50

Auch für die Versuchsreihe 2 wird das Kathodenmaterial mit der Beschichtung aus NMC 622-Aktivmaterialpartikeln verwendet, allerdings mit einer höheren Beladung von 25,1 mg/cm². Die Vorgehensweise aus Tabelle 5-1 wird nicht geändert. Aufgrund der geringeren Materialverfügbarkeit wird jedoch auf die Versuche über die unterschiedlich hohen Geschwindigkeiten verzichtet. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit in der Versuchsreihe 2 beträgt 1 m/min, siehe Tabelle 5-13. Der Versuchsplan nach BBD aus der ersten Versuchsreihe muss für diesen Fall angepasst werden. Hierbei kommt das Modell CCI (Central Composite Inscribed Design), eine Ableitung des BBDs, zum Tragen, das ebenso die Mittelpunkte auf den Parameterachsen in den Versuchsreihen beachtet. Zudem sind Zwischenpunkte vorgesehen, um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, dargestellt in Abbildung 5-26.

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse nach der Durchführung der Versuchsreihen zusammengetragen. Anschließend werden diese über geeignete Methoden auf weitere

nicht experimentell durchgeführte Parameterkombinationen übertragen. Hierzu ist eine Modellbildung über die Versuchsergebnisse erforderlich, die in Kapitel 6 erläutert ist.

Tabelle 5-13: Übersicht über den Versuchsplan 2 (A_Dieners 2020)

Versuchsnummer	Geschwindigkeit [m/min]	Walzentemperatur [°C]	Bahzug [N]
1	1	30	15
2	1	80	15
3	1	30	85
4	1	80	85
5	1	55	0
6	1	55	100
7	1	20	50
8	1	90	50
9	1	55	50
10	1	55	50
11	1	55	50
12	1	55	50
13	1	55	50
14	1	55	50
15	1	55	50
16	1	55	50

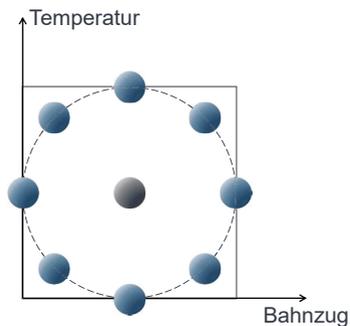


Abbildung 5-26: Darstellung des Versuchsplans CCI

6 Modellbildung

6.1 Ergebnisse der Versuchsreihen

Die ersten Ergebnisse der Versuchsreihe nach Tabelle 6-1 dienen der Erkenntnis der Wrinkle-Bildung für unterschiedliche Zieldichten. Somit kann ein Zusammenhang zwischen der Belastung der Elektrode über die Linienlast und der Wrinkle-Bildung dargestellt werden. Der Haupteinflussfaktor auf die Linienlast ist die Kalandrierwalzentemperatur, sodass auch diese in den Versuchen variiert wird. Wie in Kapitel 5.4 beschrieben, stellt eine Dichteänderung keine Option zur Verminderung oder Vermeidung der Wrinkles dar. Durchgeführt werden die Versuche mit dem in Kapitel 5.1 erläuterten Material NMC 811 nach Tabelle 6-1, visualisiert in Abbildung 6-1. Die Dichteänderung erfolgt in fünf gleichen Abstufungen von 2,3 g/cm³ zu 3,3 g/cm³.

Tabelle 6-1: Übersicht des Versuchsplans 3 für unterschiedliche Zieldichten

Versuchsnummer	Geschwindigkeit [m/min]	Walzen-temperatur [°C]	Bahzug [N]	Dichte [g/cm ³]
1	1	21	50	2,30
2	1	21	50	2,55
3	1	21	50	2,80
4	1	21	50	3,05
5	1	21	50	3,30
6	1	90	50	2,30
7	1	90	50	2,55
8	1	90	50	2,80
9	1	90	50	3,05
10	1	90	50	3,30

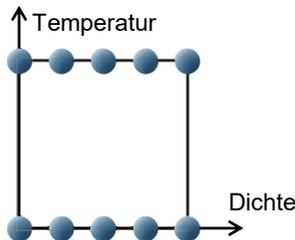


Abbildung 6-1: Darstellung des Versuchsplans zur Dichteänderung

Eine Dichteänderung spiegelt sich an den Anlagenparametern in der notwendigen Kraft zum Verdichten der Beschichtung, der Linienlast, wider. Eine Erhöhung der Kalandervalztemperaturen stellt nach Kapitel 2.3.2 eine Prozessoptimierung dar, durch die eine geringere Linienlast vonnöten ist. In Abbildung 6-2 a) sind die Wechselwirkungen zwischen der Linienlast und der Kalandervalztemperaturen in Abhängigkeit der Dichte dargestellt. Zu erkennen ist die exponentielle Abhängigkeit zwischen der Dichte und der Linienlast, die aus Kapitel 2.3 zu erwarten war. Eine höhere Dichte erfordert eine höhere Linienlast, bis eine Sättigung der Dichte eingetreten ist. Durch eine weitere Erhöhung der Linienlast ist keine stärkere Verdichtung mehr möglich. Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhöhte Kalandervalztemperaturen zu einer Verringerung der benötigten Linienlast führt. Je höher die Dichte, desto größer ist die Anzahl und die Strecke der Verschiebungen der Partikel zueinander. Den mechanischen Widerstand macht vor allem der Binder aus, der bei höheren Temperaturen die Verschiebung der Polymerketten zueinander mit geringerer Kraft zulässt. Aus diesem Grund ist der positive Effekt der hohen Kalandervalztemperaturen mit einer steigenden Verzerrung der Beschichtung verbunden.

Die Ergebnisse in Abbildung 6-2 b) zeigen den Zusammenhang zwischen der Haftkraft und der Elektrodendichte nach dem Kalandrieren. Eine Erhöhung der Dichte führt mit einer höheren erforderlichen Linienlast zu einem stärkeren Eindringen der Partikel in den Stromsammelr. Die höhere Verankerung der Partikel im Stromsammelr wie der Partikel zueinander führt zu höheren Haftkräften. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, handelt es sich dabei um eine Kombination aus Kohäsions- und Adhäsionsversagen. Es findet im Haftkraftversuch eine Trennung vom Stromsammelr, aber auch von den im Stromsammelr verankerten Partikeln zur darüber liegenden Beschichtung statt. Die bei höherer Temperatur resultierende geringere Linienlast verringert die Haftkraft, da die mechanische Verbindung zwischen den Aktivmaterialpartikeln und dem Stromsammelr schwächer ausgebildet wird. Weiterhin lässt eine höhere Kalandervalztemperaturen eine höhere Fließfähigkeit zu und folglich höhere Scherkräfte zwischen der Beschichtung und dem Stromsammelr, sodass die mechanische Bindung zwischen der Beschichtung und dem Stromsammelr geschwächt wird.

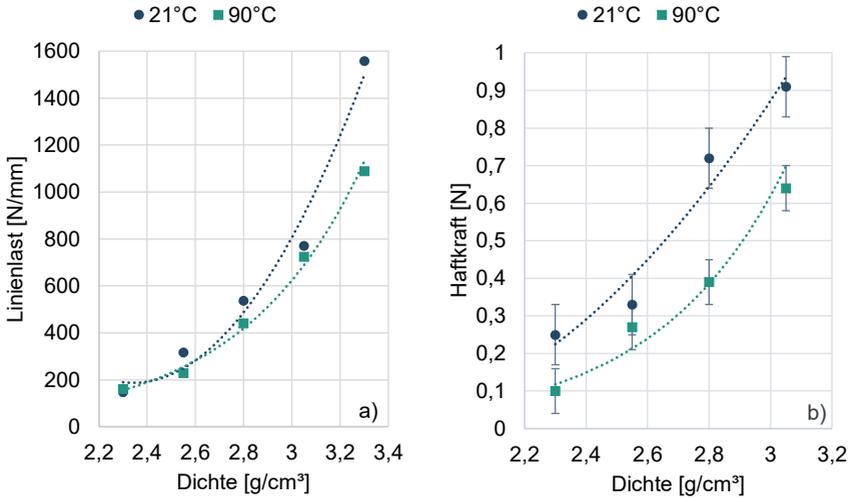


Abbildung 6-2: Zusammenhang zwischen Dichte, Linienlast, Kalanderwalzentemperatur und Haftkraft

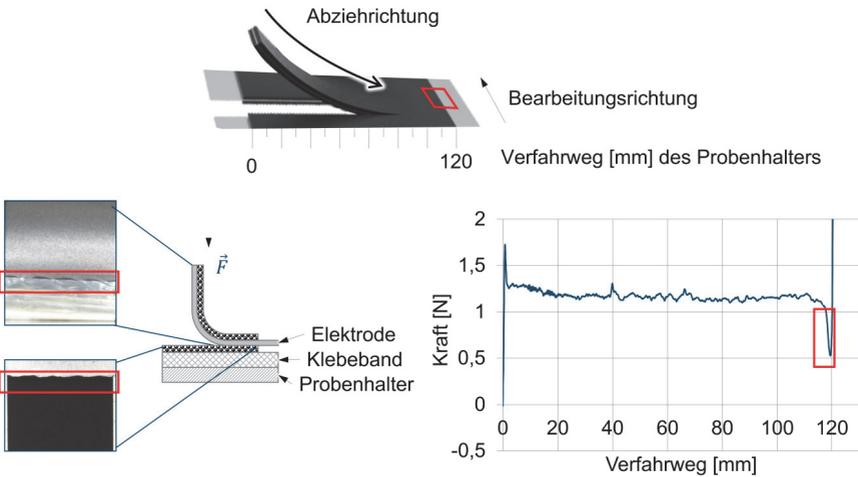


Abbildung 6-3: Einfluss der Winkles auf die Haftkraft

Ergänzend zur Ergebnisdarstellung der Haftkraft über die Versuchspunkte zeigt Abbildung 6-3 die Haftkraft örtlich an einer Probe aufgezeichnet. Hierbei ist zu erkennen, dass die sich bildenden Wrinkles nicht am Beschichtungsrand enden, sondern sich unterhalb der Beschichtung fortsetzen. Dies führt zu einem Verlust der Haftkraft im Übergangsbereich.

Die Diagramme in Abbildung 6-4 zeigen die Ergebnisse zur Wrinkle-Auswertung für unterschiedliche Dichten, die Ergebnisse zu den eingebrachten Verzerrungen in die kalandrierte Elektrode, aufgenommen über die eigenen Messsysteme, sowie das Verhalten des Flächengewichts dargestellt. Der Zusammenhang in Abbildung 6-4 a) zeigt die durch das Kalandrieren eingebrachte Materialdehnung, gemessen an der Beschichtungsoberfläche. Der Wert ergibt sich aus dem Mittelwert der Einzelwerte einer Probe in Bearbeitungsrichtung. Ein Einzelwert gibt dabei die Verschiebung von Punkt zu Punkt an, siehe Abbildung 5-11. Eine höhere Dichte erfordert eine höhere Linienlast. Eine Steigerung der Verdichtungskräfte bedingt erhöhte Scherkräfte und somit sind stärkere Oberflächenverschiebungen zu erkennen. Ein durch die Kalandrierwalzentemperatur bedingter Einfluss ist dabei nicht zu erkennen. Folglich hat die Kalandrierwalzentemperatur keine signifikante Auswirkung auf die Dehnung der Beschichtungsoberfläche.

Analog dazu zeigen die Ergebnisse aus Abbildung 6-4 b) eine Auswirkung der erhöhten Scherkräfte. Die Verschiebung zwischen der neutralen Faser der Elektrode, die der Mittelachse des Stromkollektors entspricht, und der Beschichtungsoberfläche wird mit steigender Dichte höher. Diese Verzerrung führt zu einer geringfügigen Verringerung des Flächengewichts. Eine erhöhte Kalandrierwalzentemperatur verbessert die Fließfähigkeit der Beschichtung und verstärkt dadurch den Effekt der Ausdünnung.

Die Wrinkle-Ausprägung an sich wird in Abbildung 6-4 c) und d) dargestellt. Die Daten in Abbildung 6-4 d) zeigen die Wrinkle-Parameter Höhe und Winkel für die Versuchsreihe bei einer Kalandrierwalzentemperatur von 90°C. Trotz unterschiedlicher Dichten sind keine Unterschiede zu erkennen. Im Gegensatz dazu zeigt sich die Wrinkle-Länge als brauchbarer Wrinkle-Parameter. Zur Verdeutlichung der Wrinkle-Ausprägung erfolgt die Definition des Wrinkle-Faktors, der die Summe aller Wrinkle-Längen ist. Für die weiteren Versuchsreihen wird daher ausschließlich die Wrinkle-Länge zur Beurteilung des Elektrodendefektes Wrinkle herangezogen.

Abbildung 6-4 c) zeigt, dass die Wrinkle-Länge signifikante Unterschiede zu den einzelnen Dichten aufweist und dass die Wrinkle-Ausprägung mit zunehmender Dichte

stärker wird. Eine höhere Temperatur trägt zwar zu einer Verringerung der notwendigen Linienlast, aber gleichzeitig zu einer stärkeren Wrinkle-Ausprägung bei.

Für den Kalandrierversuch mit einer Kalandrwalzentemperatur von 90°C sind der Wrinkle-Winkel und die Wrinkle-Höhe in Abbildung 6-4 d) angegeben. Für die unterschiedlichen Dichten sind keine eindeutigen Tendenzen der Größen zu erkennen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse aus Abbildung 6-4, dass die zu erzielende Elektrodendichte den größten Einfluss auf die Wrinkle-Bildung hat. Die Wrinkle-Bildung korreliert einerseits mit der Dehnung der Beschichtungsoberfläche, andererseits aber vor allem mit der Verschiebung zwischen der Beschichtung und dem Stromsammelr. Eine höhere Kalandrwalzentemperatur fördert die Scherbeanspruchungen, bedingt eine Verringerung des Flächengewichts und verstärkt eine Wrinkle-Bildung.

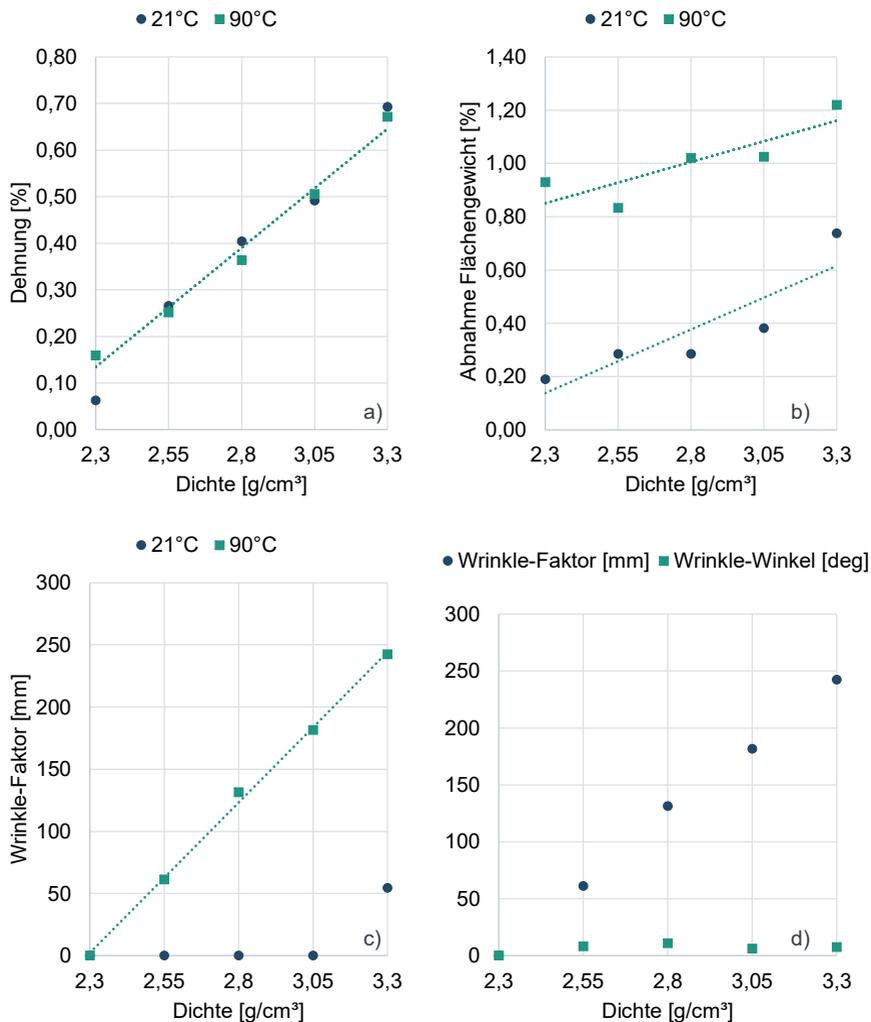


Abbildung 6-4: Wrinkle-Ausprägung und Dehnung der Beschichtungsfläche in Abhängigkeit zur Elektrodendichte

Der Bahnzug hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Ausbildung der Wrinkles, dargestellt im Diagramm in Abbildung 6-5. Ein erhöhter Bahnzug führt zu einer verstärkten Wrinkle-Bildung, gemessen an der Wrinkle-Länge. Im Kalanderspalt erfährt die Beschichtung eine Verzerrung, der unbeschichtete Bereich bleibt unberührt. Es erfolgt ein Rückstau der Beschichtung, dargestellt im Querschnitt in Abbildung 6-5, vergleiche Abbildung 3-1, wodurch der Stromsammler der Beschichtung vor eilt. Die Draufsicht zeigt das Voreilen des unbeschichteten Randbereichs im Vergleich zum gedehnten beschichteten Bereich. Über die eingezeichneten Punkte in Abbildung 6-5 ist in der Draufsicht die Wrinkle-Entstehung am Übergangsbereich vom unbeschichteten zum beschichteten Bereich zu erkennen. Der Kalanderspalt ist mit dem unbeschichteten Rand nicht im Eingriff. Daher kann der wirkende Bahnzug den Randbereich konstant fördern. Ein höherer Bahnzug führt zu einem verstärkten Voreilen des Randbereichs und infolgedessen zu längeren Wrinkles.

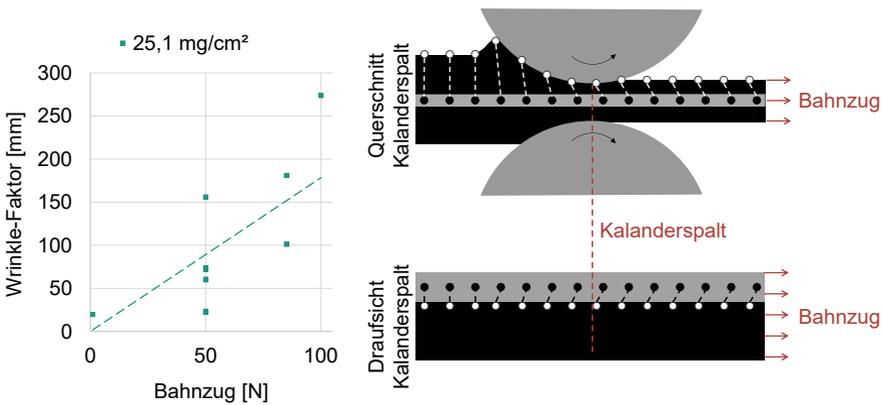


Abbildung 6-5: Einfluss des Bahnzuges auf die Wrinkle-Ausprägung

Zur Vervollständigung des Prozessverständnisses wird die Welligkeit der Elektrode gemessen. Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, stellt die Wellenbildung einen grundlegenden Elektrodendefekt und Phänomen eines Walzvorgangs dar. Die Wellenbildung und die Eigenspannungen in der Beschichtung sind die Auslöser der Wrinkle-Bildung. Die Elektrodenwelligkeit, dargestellt in Abbildung 6-6, wird dabei über Höhenprofile der gescannten Oberfläche mit dem GOM-System angegeben. Beispielhaft sind in Abbildung 6-6 ein Höhenprofil sowohl in als auch quer zur Bearbeitungsrichtung angegeben. Die

Farben des Rasters zeigen den Versatz zur Höhe der Beschichtungskante. Eine hohe Dichte und eine hohe notwendige Linienlast führen zu einer hohen Verzerrung und Verschiebung im beschichteten Bereich. Die Ausdehnung des beschichteten Bereichs kann jedoch nicht allein in der x-y-Ebene erfolgen, da der beschichtete Bereich durch den unbeschichteten Bereich begrenzt ist. Die Folge ist eine Verlagerung in die z-Achse und somit eine Wellenbildung.

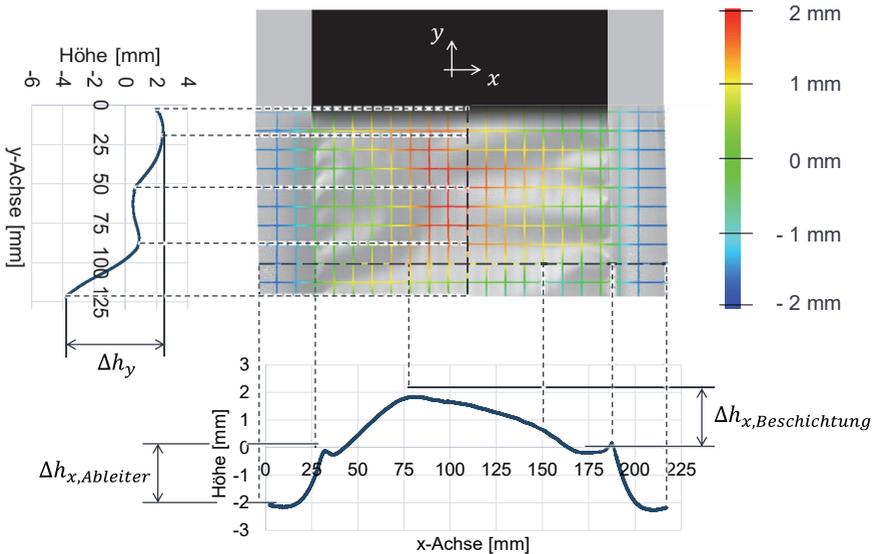


Abbildung 6-6: Datenaufnahme der Wellen einer Elektrode

Die Ergebnisse der Wellenbildung werden über die einzelnen Profile, vergleichbar mit Abbildung 6-6, für die Experimente aus den Versuchsreihen festgehalten. Die Auswertung der Wellenprofile beinhaltet die Anzahl der Amplituden sowie deren Maximalwerte als Ergebnis.

Abbildung 6-7 ist eine Übersicht zur Auswertung der Wellenbildung aus den Ergebnissen aller Versuchspläne. Die Wellenbildung wird sowohl im beschichteten und unbeschichteten Bereich als auch in und quer zur Bearbeitungsrichtung ausgewertet. Eine Auswertung des unbeschichteten Bereichs in Bearbeitungsrichtung weist lediglich eine Profilline auf, sodass keine belastbare statistische Aussage getroffen werden kann. Für

den Bahnzug werden die Werte 1 N und 100 N miteinander verglichen, für die Kalandervalztemperatur 21°C und 90°C und für die Dichte 2,3 g/cm³ und 2,8 g/cm³.

Die erste Zeile in Abbildung 6-7 zeigt die Ergebnisse der Wellenbildung im unbeschichteten Bereich quer zur Bearbeitungsrichtung. Dies entspricht gemäß Abbildung 6-6 der x-Achse. Mit geringerem Bahnzug ist die Elektrode geringer gespannt und somit erscheinen die Werte für die Wellen im unbeschichteten Bereich höher. Für eine höhere Kalandervalztemperatur gilt eine verringerte Linienlast und daher eine geringere Eigenspannung quer zur Bearbeitungsrichtung. Vergleichend zu Abbildung 3-9 ist somit eine verminderte Faltenbildung in Bearbeitungsrichtung zu erwarten. Eine höhere Dichte führt zu höheren Belastungen der Elektrode und daher zu einer verstärkten Wellenbildung. Dieser Zusammenhang ist ebenso im unbeschichteten Bereich quer zur Bearbeitungsrichtung zu erkennen.

Die zweite Zeile in Abbildung 6-7 beinhaltet die Ergebnisse der Wellenbildung im beschichteten Bereich auf der x-Achse, das heißt quer zur Bearbeitungsrichtung. Für den Bahnzugvergleich gibt es keine signifikante Unterscheidung in der Wellenbildung. Die Ursache dafür ist, dass der Bahnzug hauptsächlich über den unbeschichteten Randbereich aufgebracht wird. Der beschichtete Bereich hat durch das Kalandrieren eine Längung erfahren und hängt zwischen den unbeschichteten Bereichen durch. Eine Kalandervalztemperatur von 90°C führt, wie oben beschrieben, zu einer stärkeren Verdrängung der Beschichtung im Vergleich zur Kalandrierung mit einer Kalandervalztemperatur von 21°C. Dies führt zumindest in den Amplituden zu einer stärkeren Wellenbildung.

Die dritte Zeile in Abbildung 6-7 spiegelt die Wellenbildung der beschichteten Fläche in Bearbeitungsrichtung auf der y-Achse wider. Die Bahnzugkraft allein erhöht hierbei die Dehnung der Elektrode in Bearbeitungsrichtung geringfügig. Dadurch kann eine höhere Amplitude gemessen werden. Eine größere Wellenlänge führt zu einer geringen Anzahl an Extremstellen im festgehaltenen Ausschnitt. Eine größere Dichte führt zu einer stärkeren Belastung der Elektrode und in Folge zu einer stärkeren Wellenbildung.

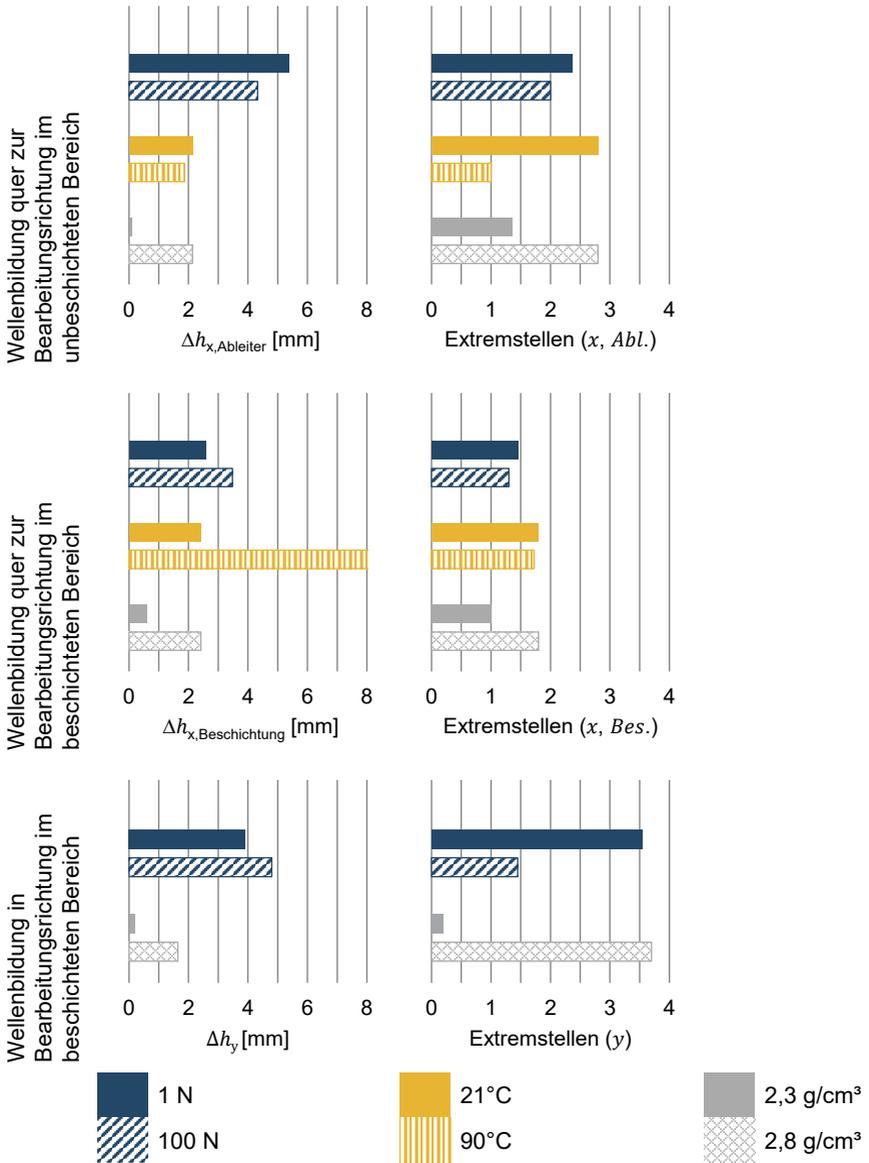


Abbildung 6-7: Auswertung der Wellenbildung der Elektroden

Der entscheidende Faktor für die Ausprägung der Wellenbildung ist die Zieldichte der Elektrode. Ebenso hat der Kalandersparameter Bahnzug einen Einfluss auf die Ausprägung der Elektrodendefekte. In Bearbeitungsrichtung sorgt ein hoher Bahnzug für eine Verminderung der Wellenbildung. Ebenso weist der unbeschichtete Randbereich eine geringere Wellenbildung bei erhöhtem Bahnzug auf. Quer zur Bearbeitungsrichtung zeigen die Ergebnisse keine deutliche Auswirkung des Bahnzugs auf die Welligkeit, nur in Bearbeitungsrichtung. Abbildung 6-8 zeigt die unterschiedlichen Wellenbildungen im beschichteten Bereich für die ausgewerteten Bahnzüge 1 N und 100 N. Da eine höhere Bahnzugkraft den unbeschichteten Randbereich strafft und die Wellen im beschichteten Bereich mit einer größeren Wellenlänge ausbildet, wird ein höherer Bahnzug als positiv bewertet. Elektrodenblätter mit einer verringerten Wellenausprägung sorgen somit für eine höhere Qualität in der Zellstapelbildung.

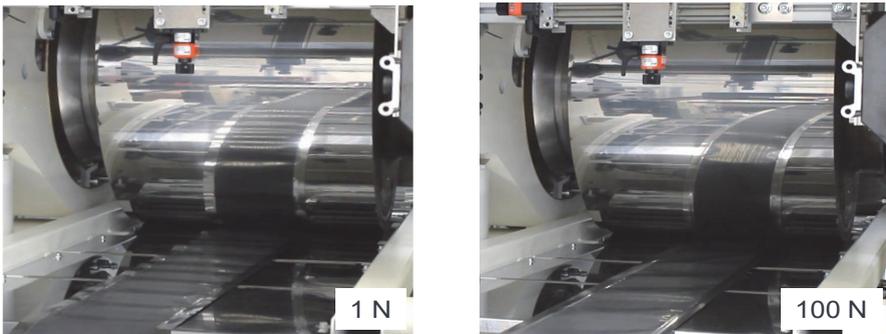


Abbildung 6-8: Auswirkung des Bahnzugs auf die Wellenbildung

Die Ergebnisse zeigen, dass mit steigender Dichte eine Zunahme der Fehlerausprägung zu messen ist. Da die Materialdichte nicht in den Optimierungsbereich der Anlage fällt, dient diese Erkenntnis zur Erweiterung des Prozessverständnisses und verdeutlicht die Notwendigkeit zur Erarbeitung von Gegenmaßnahmen. Die Erhöhung der Kalanderswalzentemperatur hat eine positive Auswirkung auf die erforderliche Linienlast. Die Verringerung der Linienlast hat für die Beschichtung den Vorteil, dass eine geringere Anzahl an Partikelbrüchen vorkommen. Allerdings führt die höhere Kalanderswalzentemperatur zu einer verbesserten Fließfähigkeit der Beschichtung und somit zu einer verstärkten Wrinkle-Bildung.

Die Erhöhung der Bahnzugkraft hat eine positive Auswirkung auf die Wellenbildung und ist für eine prozesssichere Handhabung notwendig. Hierbei ergibt sich jedoch das Problem einer verstärkten Wrinkle-Bildung mit erhöhtem Bahnzug. Damit wird das Optimierungsziel der Fehlerminimierung vor einen Zielkonflikt gestellt, da entweder eine Minimierung der Wrinkle-Bildung inklusive einer Verringerung der Prozessstabilität aufgrund geringer Bahnzüge und niedriger Temperaturen in Kauf genommen wird oder eine geringere Ausbildung der Wellen das Ziel ist.

6.2 Modellbildung des Kalandrierprozesses nach aktuellem Stand der Technik

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine Prozessoptimierung bei gleichzeitiger Fehlervermeidung nicht möglich ist. Die Versuchsergebnisse aus Kapitel 6.1 sind einzelne Ergebnispunkte zu ausgewählten Kalandrierparameter, entsprechend den Versuchsplänen, siehe Abbildung 5-25. Die Wechselwirkungen zwischen den Anlagenparametern und dem Elektrodendefekt Wrinkle sind für die Zwischenräume somit nicht bekannt. Um Werte für die Zwischenräume abzuleiten, ist eine Modellbildung notwendig.

Ein möglicher Modellansatz kann unabhängig von der Problemstellung als linearer Ansatz, Polynom-Modell, Künstliches Neuronales Netz oder Fuzzy-System gewählt werden (Kroll 2013). Die Ergebnisse aus den Versuchen zeigen bezüglich der Wrinkle-Bildung zwischen dem Materialverhalten und den Anlagenparametern keine linearen Zusammenhänge. Als Grundlage der Modellbildung des Kalandrierprozesses mit nicht linearen Zusammenhängen dienen Black-Box-Modelle. Künstliche Neuronale Netze können für Black-Box-Modelle mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen eingesetzt werden und sind bei richtiger Anwendung robust gegen Störgrößen und einzelnen Datenfehlern (Siebertz & van Bebber et al. 2017). Die Modellbildung für den aktuellen Stand der Technik mit den Ergebnissen aus Kapitel 6.1 wird mithilfe von künstlichen neuronalen Netzen mit der Struktur aus MLP-Netzen (Multi-Layer-Perceptron) aufgebaut. Hierbei handelt es sich um vorwärtsgerichtete Netze mit mindestens einer verdeckten Schicht. Ein zweischichtiges und vorwärtsgerichtetes Netz mit einer Schicht trainierbarer Gewichte wird als Perceptron bezeichnet. MLP-Netze verfügen dadurch über mindestens zwei Schichten von Gewichten und eignen sich zum Modellieren von nichtlinearen Zusammenhängen (Kroll 2013). In Abbildung 6-9 ist der allgemeine Aufbau eines MLP-Netzes dargestellt. Es besitzt Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie die dazwischen liegenden Schichten mit den Neuronen. Ein Neuron erhält Eingangssignale und

gibt Ausgangssignale an das nächste Neuron weiter. Die Eingangssignale werden über eine Aktivierungsfunktion verarbeitet und weitergeleitet. Über die Backpropagation-Methode werden die Werte der Gewichte über eine Rückspeisung angepasst.

Das Netz besitzt, bezogen auf den Kalandrierprozess, die drei Eingänge Kalendarwalzentemperatur, Bahnzug und Prozessgeschwindigkeit, für die jeweils Trainingsdaten vorgesehen sind. Die Anzahl an Neuronen entspricht der Länge der jeweiligen Eingangsvektoren. Die Ausgabeschicht besteht aus einem Neuron, das die Wrinkle-Länge approximiert.

Für die Trainingsdaten aus der ersten Versuchsreihe, siehe Tabelle 5-12, ergeben sich über 15 Versuche 15 Neuronen. Die Ergebnisdaten der Versuchsreihe über die BBD Darstellung, siehe Abbildung 5-25, werden als Referenzwerte festgehalten. Zum erfolgreichen Training des Netzes werden zulässige Fehlerabweichungen zwischen der Netzausgabe und den jeweiligen Referenzwerten aus den Trainingsdaten definiert.

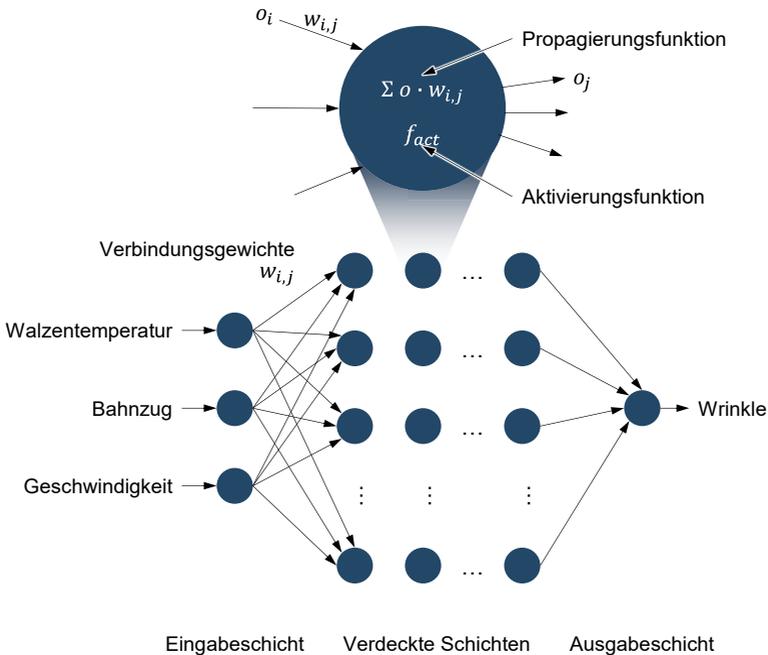


Abbildung 6-9: MLP-Netz zur Wrinkle-Modellbildung

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 6-10 aufgeführt. Die Achsen beschreiben die in den Experimenten variierten Anlagenparameter. Die farbliche Darstellung entspricht der Wrinkle-Länge. Diese wird als Summe der gemessenen Wrinkles pro Versuchsprobe angegeben. Die Referenzpunkte, die den Versuchsergebnissen entsprechen, sind über Quadrate eingezeichnet. Damit entspricht die Farbgebung in den Quadraten den Versuchsergebnissen und die Farben in den Zwischenräumen den Modellergebnissen aus der Berechnung mit dem neuronalen Netz im Sinne einer Black-Box-Modellierung.

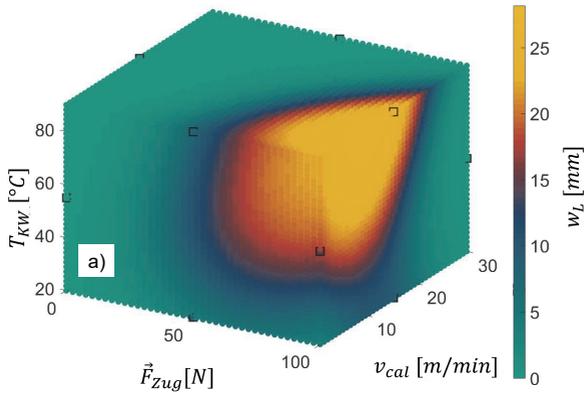
Die Trainingsdaten und die experimentellen Ergebnisse aus Tabelle 5-12 sind in Abbildung 6-10 a) dargestellt. Dabei ist eine starke Auswirkung des Bahnzugs auf die Wrinkle-Bildung zu erkennen. Die Kalandervalztemperatur hat ebenfalls einen Einfluss auf die Wrinkle-Bildung, wie bereits aus den Ergebnissen in Kapitel 6.1 erarbeitet. Des Weiteren ist ein Zusammenhang zur Kalandriergeschwindigkeit zu erkennen. Eine höhere Geschwindigkeit führt zu einer Verringerung der Wrinkle-Bildung, unter Einfluss von Kalandervalztemperatur und Bahnzug. Zur Modellbildung ist zu erwähnen, dass es zu dem Punkt $T_{KW} = 80^{\circ}\text{C}$, $\vec{F}_{Zug} = 100\text{ N}$ und $v_{cal} = 30\text{ m/min}$ keinen Versuchspunkt gibt und somit das Modellergebnis für diesen Punkt nicht validiert ist. Dennoch ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit bei mittlerer Kalandervalztemperatur und maximalem Bahnzug zu erkennen. Eine Erhöhung der Kalandriergeschwindigkeit bedingt eine kürzere Wirkzeit der Linienlast auf die Elektrode. Damit werden die Belastungen für die Elektrode geringer, sodass eine Verringerung der Fehlerausprägung zu erkennen ist. Eine erhöhte Kalandriergeschwindigkeit führt jedoch aufgrund der geringeren Wirkzeit der Kraft zu einem stärkeren Relaxationseffekt und somit material- und geschwindigkeitsabhängig zur einer geringen Zieldichte.

Im zweiten Schritt wird das neuronale Netz auf die Ergebnisse der Versuchsreihe aus Tabelle 5-13 übertragen. Dabei ergibt sich nach gleicher Darstellungsweise der Ergebnisraum in Abbildung 6-10 b). Da die Versuchsreihe bei konstanter Geschwindigkeit durchgeführt ist, ist die Wrinkle-Länge lediglich über die Temperatur und den Bahnzug aufgetragen. Hierbei ist zu erkennen, dass sowohl eine hohe Temperatur als auch ein hoher Bahnzug zu einer Verstärkung der Wrinkle-Bildung führen. Eine Kombination aus maximaler Kalandervalztemperatur und maximalem Bahnzug scheint dabei eine geringfügig kleinere Auswirkung auf die Wrinkle-Ausprägung im Vergleich zu den

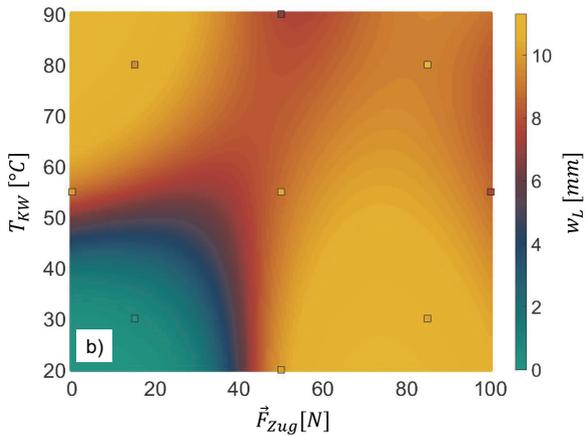
Maximalwerten der einzelnen Parameter zu haben. Auch hierbei ist das Modellergebnis im Bereich des Punktes zu $T_{KW} = 80^\circ\text{C}$ und $F_{Zug}^2 = 100\text{ N}$ nicht validiert.

Die Ergebnisse der Modellbildung spiegeln die Ergebnisse und Diskussion aus Kapitel 6.1 wider. Die für ein Betriebsoptimum zu maximierenden Prozessparameter Kalandrwalzentemperatur und Bahnzug führen zu einer verstärkten Ausprägung von Elektrodenfehlern, insbesondere zur Wrinkle-Bildung. Eine Prozessoptimierung mit dem Fokus auf eine Fehlerminimierung der Wrinkles lässt sich allein mit den Anlagenparametern nach heutigem Stand der Technik Kalandrierprozess nicht umsetzen.

Das neuronale Netz dient weiterhin zur Vorhersage einer Wrinkle-Bildung in den Ergebniszwischenräumen. Anzumerken ist, dass eine Verfeinerung über weitere Versuchsergebnisse möglich ist. Aufgrund der starken Materialabhängigkeit der Modellergebnisse ist eine Übertragung auf weitere Materialien vorsichtig zu betrachten.



□ experimentelle Versuchsergebnisse



T_{KW} [°C] Kalandrerwalzentemperatur v_{cal} [m/min] Kalandriergeschwindigkeit
 \vec{F}_{Zug} [N] Bahnzugkraft am Zugwerk w_L [mm] Wrinke-Gesamtlänge

Abbildung 6-10: Modellergebnisse

7 Anti-Wrinkle-Modul

7.1 Ursache der Wrinkle-Bildung

Das Kalandrieren der Elektrode führt im beschichteten Bereich zu Änderungen der Materialeigenschaften. Kapitel 2.3.2 beschreibt dazu, dass der beschichtete Bereich nach dem Kalandrieren eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls und eine geringere Bruchdehnung aufweist. Der unbeschichtete Bereich erfährt keine Änderungen. Allein die Beschichtung ist im Eingriff mit dem Kalanderspalt, sodass die Messung der Dehnung, wie in Abbildung 7-1 dargestellt, nur im beschichteten Bereich messbar ist. Wie in Kapitel 3.3 zu Abbildung 3-7 erläutert, führt der Längenunterschied zwischen dem beschichteten und dem unbeschichteten Bereich zu einer Wellenbildung und mit der Überlagerung des Bahnzugs zur Wrinkle-Bildung.

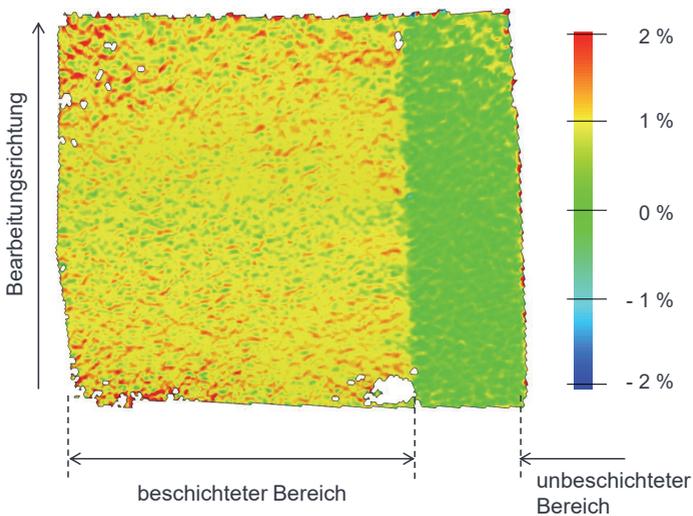


Abbildung 7-1: Dehnungsunterschied zwischen dem beschichteten und dem unbeschichteten Bereich

Zur Ergänzung der Modellbildung wird die beschriebene Ursache der Wrinkle-Bildung in Abbildung 7-2 über eine FEM-Simulation dargestellt. In Zeile 1 in Abbildung 7-2 ist das Ergebnis einer Verdichtung einer Elektrode zwischen zwei rotierenden Walzenhohlkörpern dargestellt. Die Walzenhohlkörper sind Starrkörper, da für die Walzen

keine Verformung im Kalandrierprozess angenommen ist. Die Materialeigenschaften der Elektrode sind als Materialverbund zugewiesen, wobei die Daten einem Zugversuch entstammen. Die Haftbedingungen zwischen der Beschichtung und der Folie sind dabei nicht dargestellt. Mit einem Verstärkungsfaktor für die Darstellung wird der Rückstau vor dem Kalanderspalt verdeutlicht. Das Ergebnis dieser Simulation wird in eine weitere Simulation überführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 7-2 in Zeile 2 dargestellt. Dort abgebildet ist der unbeschichtete Bereich, wobei an der oberen Kante die Ergebnisse der Verzerrung übergeben sind. Die Überlagerung der Bahnzugkraft erzeugt die Wrinkle-Bildung.

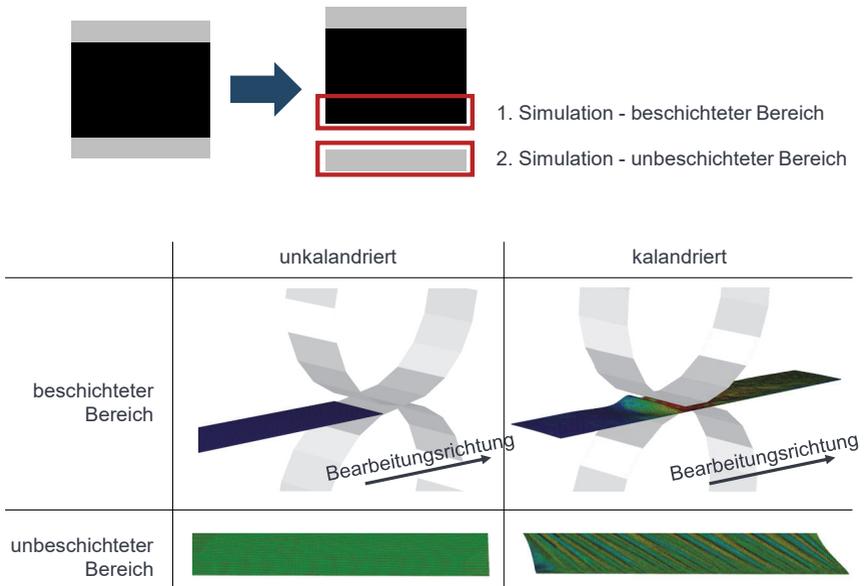


Abbildung 7-2: Simulation des Walzprozesses (in Anlehnung (A_Türke 2021))

Folglich lässt sich aus den experimentellen Untersuchungen und der Modellierung die Ursache der Wrinkle-Bildung im Dehnungsunterschied zwischen dem beschichteten Bereich und dem unbeschichteten Bereich ableiten.

7.2 Anforderungen an das Anti-Wrinkle-Modul

Eine weitreichende Maßnahme gegen die Wrinkle-Bildung erfordert einen materialunabhängigen Ansatz und somit eine prozessseitige Lösung an der Kalandieranlage. Die Festanforderung abgeleitet aus den Ergebnissen, ist die Beseitigung des Unterschiedes der mechanischen Eigenschaften zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Bereich. Die in die Beschichtung eingebrachten Verzerrungen können prozessbedingt nicht verringert werden. Die aufgebrachte Beschichtung wird mit hohen Kräften verdichtet, weswegen mit den Ergebnissen aus Kapitel 6 keine Anpassung der Prozessparameter zur Verringerung der Beanspruchung möglich ist. Folglich sind in die unbeschichteten Randbereiche Dehnungen einzubringen, sodass über die Elektrodenbreite hinweg ein homogener Zustand erreicht wird.

Tabelle 7-1 fasst die möglichen Lösungen zusammen, die eine technische Umsetzung für den Verzerrungseintrag in den Randbereich als anlagenseitige Maßnahme darstellen. Darüber hinaus stellt die Tabelle eine Entscheidungsmatrix mit entsprechenden Kriterien und Gewichtungen dar.

Eine Gegenmaßnahme soll nicht nur materialunabhängig sein, sondern auch prozess- und anlagenseitig keine grundsätzlichen Änderungen fordern. Die Kriterien zur Bewertung der Lösungsmöglichkeiten beurteilen, ob ein weitreichendes Konzept vorliegt. Die Unabhängigkeit vom Elektrodenmaterial bezogen auf die eingesetzten Aktivmaterialien, die Zieldichte und den Stromsammelner werden über die Kriterien Flexibilität und Inline-Regelbarkeit abgedeckt. Für eine hohe Flexibilität muss eine große Bandbreite an Dehnungswerten eingebracht werden können, wie auch die Gegenmaßnahme für unterschiedliche Elektrodenformate einsetzbar sein, siehe Abbildung 2-8. Die Inline-Regelbarkeit deckt die Fähigkeit ab, dass das neue System unterschiedliche Dehnungswerte automatisiert anfahren kann. Die Flexibilität erhält als Kriterium keine hohe Gewichtung, da im Vordergrund die Funktionserfüllung steht und die Anpassung an weitere Materialien oder Elektrodenformate im Anschluss erfolgen kann. Im Gegensatz dazu wird die Inline-Regelbarkeit hoch gewichtet, da dies die Grundlage für eine Anpassung in Echtzeit ist.

Als weiteres Kriterium ist die Möglichkeit einer präzisen Bearbeitung des unbeschichteten Randbereichs notwendig. Hierzu sind berührende Komponenten mit einer präzisen Aktuatorik auszustatten, da die Aluminiumfolie mit einer Dicke von 12 µm oder

15 µm eine präzise Handhabung erfordert. Dieses Kriterium ist wichtig und erhält daher eine hohe Bewertung.

Mit den Kriterien Bauraum, Add-On-Fähigkeit und Kosten der technischen Umsetzung wird die Integration eines zusätzlichen Systems oder Verfahrens geprüft. Die Lösung soll einen geringen Bauraum einnehmen. Weiterhin ist das Ziel, den Prozess Stand der Technik nicht grundlegend zu verändern, sodass eine Lösung einen Zusatz darstellt und keine aufwendigen Änderungen an der Anlage, wie zum Beispiel am Bahnverlauf vonnöten sind. Aus diesem Grund hat die Gewichtung der Kriterien Bauraum und Add-On-Fähigkeit eine große Bedeutung. Der Kostenfaktor erhält jedoch eine geringe Gewichtung, da in dieser Arbeit die Umsetzbarkeit und der Funktionsnachweis eines zusätzlichen Systems im Vordergrund steht.

Die beiden weiteren Kriterien Ursachenbehebung und Machbarkeit bewerten die Funktion des Lösungsansatzes. Die Ursache, der Dehnungsunterschied zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Bereich, muss über die Einbringung einer Dehnung in den unbeschichteten Bereich gelöst werden. Diesen beiden Kriterien kommt die höchste Bedeutung und die höchste Gewichtung zu, da sowohl die Funktionserfüllung als auch die Machbarkeit die Voraussetzung für eine erfolgsversprechende Lösung sind.

Die Beaufschlagung einer Dehnung in den Randbereichen kann prinzipiell über eine Materialänderung oder durch das Fertigungsverfahren Umformen erfolgen. Wie für die Beschichtung gilt auch für den Stromsammel, dass keine Änderung am Material vorgenommen wird, da das Ziel eine materialunabhängige Lösung ist. Ein Beispiel wäre, den unbeschichteten Randbereich im Vorfeld so zu behandeln, dass sich die Materialeigenschaften verändern und für die Bearbeitung im Kalandrierprozess der unbeschichtete und der beschichtete Bereich auf die Belastungen ähnlich reagieren. Aus diesem Grund liegt der Fokus der Lösungsansätze im Bereich des Fertigungsverfahrens Umformen. Das Umformen einer Folie kann durch Druckumformen, durch Zugdruck- oder durch Zugumformen erfolgen. Druckumformen ist ein Walzen und Zugumformen eine Längung des Randbereiches. Eine Zugdruckumformung kann zum Beispiel durch ein Prägwerkzeug erfolgen.

Ein Walzen des unbeschichteten Randbereiches ist entweder vor dem Beschichtungsprozess oder integriert in den Kalandriervorgang möglich. Zu beachten ist dabei allerdings, dass ein segmentiertes Walzen eines Stromkollektors vor dem Beschichtungsprozess zu einer Wellenbildung führen würde, da eine ungleichmäßige Dehnung

vorhanden wäre. Umsetzen lassen würde sich das Walzen im Kalandriervorgang über eine Kalandrierwalze mit Wellenabsätzen für den unbeschichteten Bereich, skizziert in Abbildung 7-3. Dadurch wäre eine präzise Verarbeitung möglich, dennoch wäre ein individuelles Werkzeug für jedes Elektrodenformat notwendig. Ein Walzen des unbeschichteten Bereichs im Kalandriervorgang selbst würde enorme Schwierigkeiten bei der Abstimmung der Kräfte zwischen dem beschichteten Bereich zum unbeschichteten Bereich mit sich bringen. Auch die Kosten für ein präzises Walzen der dünnen Aluminiumfolie machen dies nicht zu einer realistischen Lösung.

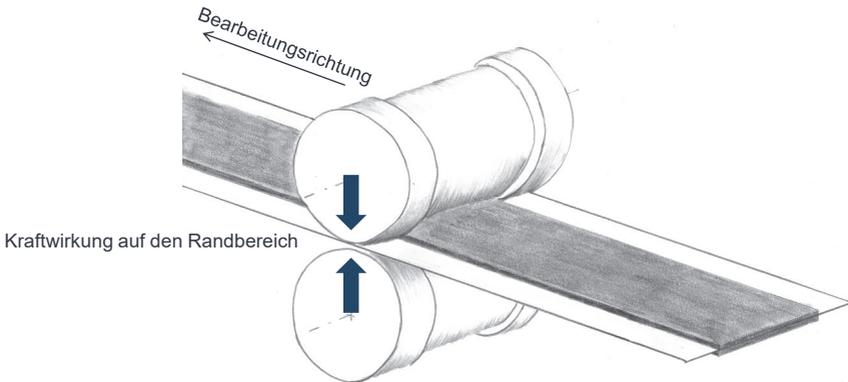


Abbildung 7-3: Konzept für Druckumformen

Für ein Fertigungsverfahren im Bereich Zugdruckumformen könnten Prägungen oder Umformungen wie beim Tiefziehen eine Option darstellen. Als Variante für eine Metallfolie würden hierbei eine Prägung infrage kommen, die entweder mitläuft, vergleichbar mit einem Zahnrad, oder die durch eine oszillierende Bewegung Verformungen in das Material einbringt, skizziert in Abbildung 7-4. Die Materialhandhabung würde für den Fall sehr präzise ausgelegt werden müssen, da Prägemuster Schwachstellen im Material erzeugen. Die dabei entstehenden Unsicherheiten für die nachfolgenden Prozessschritte, wie dem Fügen der Ableiter, schaffen Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten. Dies erhöht die Komplexität einer Prozessoptimierung. Selbst das Führen über die Umlenkwalzen an der Kalandrierlinie würde aufgrund der Sollbruchstellen im Ableiterbereich eine hohe Risswahrscheinlichkeit mit sich bringen.

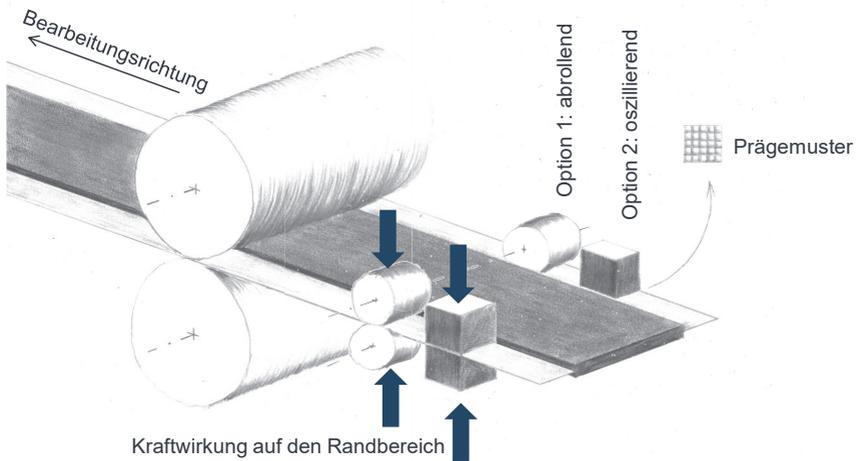


Abbildung 7-4: Konzept für Zugdruckumformen mittels einer Prägung

Der Bahnzug am Kalanderspalt wird an den Zugwerken über eine Umlenkwalze durch eine anliegende gummierte Rolle erzeugt. Nach demselben Prinzip, kann ein Zugumformen für den unbeschichteten Randbereich umgesetzt werden. Die Verzerrung, die in die Beschichtung durch den Kalanderspalt eingebracht wird, muss in übertragener Größe um den Kalanderspalt in den unbeschichteten Bereich eingebracht werden. Damit eine definierte zusätzliche Zugkraft auf den Randbereich eingebracht werden kann, muss es, ähnlich zu einem Zugwerk, ziehende und bremsende Einheiten geben. Damit würde dieser Lösungsvorschlag ein Zugwerk für den Randbereich vor und nach dem Kalanderspalt vorsehen, skizziert in Abbildung 7-5. Da damit direkt die Ursache, einer fehlenden Dehnung im Randbereich, angegriffen wird, erfolgt eine hohe Bewertung der Ursachenbehebung. Das zusätzliche Einbauen von Umlenkwalzen und segmentierten Rollen stellt keinen erheblichen konstruktiven Mehraufwand dar, sodass die Kriterien Bauraum, Add-On Fähigkeit und Machbarkeit ebenfalls eine hohe Bewertung erhalten können. Mit zusätzlichen Umlenkwalzen kann die Flexibilität gewährleistet werden. Da bereits verbaute Umlenkwalzen mit Drehmoment-, Drehzahlsensoren oder Antrieben versehen sind, gibt es keinerlei Bedenken bezüglich der Inline-Regelbarkeit. Allein die

erreichbare Präzision ist durch die Konstruktion und die einzusetzenden Komponenten sicherzustellen, sodass dies einer Unsicherheit entspricht.

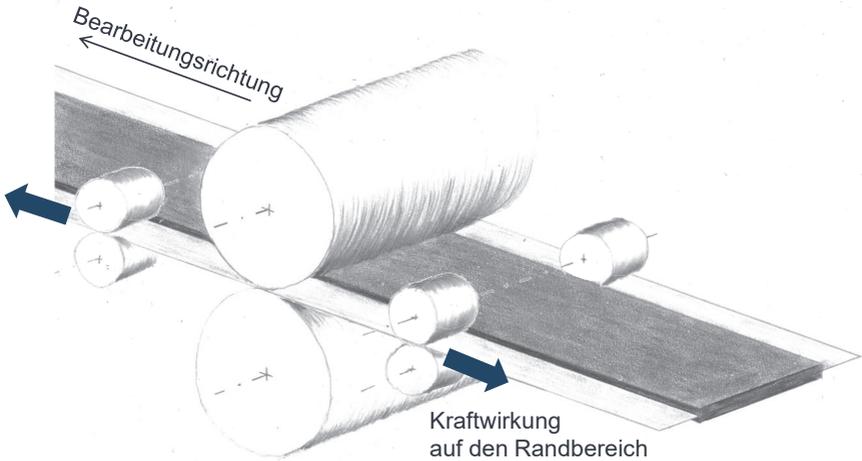


Abbildung 7-5: Konzept für Zugumformen

Zusätzlich zum Lösungsbereich aus der Fertigungsgruppe Umformen lässt ein Wärmeintrag eine höhere Verformung aufgrund höherer Duktilität zu. Ein präziser Eingriff in den Prozess, durch den nur der unbeschichtete und nicht der beschichtete Bereich erwärmt wird, lässt sich nur schwer realisieren. Des Weiteren würde eine alleinige Erwärmung des Randbereichs nicht zur Ursachenbehebung beitragen. Die Steigerung der Duktilität erleichtert zwar das Einbringen von Dehnungen, kann diese aber allein nicht umsetzen. Aus diesem Grund eignet sich auch dieser Ansatz nicht als alleinstehende Lösungen zur Wrinkle-Vermeidung, kann aber als weitere Ergänzung für einen eigentlichen Lösungsansatz in Betracht gezogen werden.

Tabelle 7-1: Entscheidungsmatrix

Gewichtung		1 2 3 4 5 6					
		Ränder vorverdichten	Konturänderung an Kalandrwalzen	Prägwalzen im Randbereich	Oszillierende Verformung	Segmentierter Bahnzug für den Randbereich	Erhöhung des Wärmeintrags
Flexibilität	0,04	8,00	1,00	1,00	9,00	9,00	8,00
Inline Regelbarkeit	0,16	6,00	1,00	2,00	9,00	9,00	7,00
Präzise Bearbeitung	0,14	2,00	9,00	3,00	6,00	5,00	3,00
Bauraum	0,12	2,00	9,00	9,00	5,00	7,00	5,00
Add-On Fähigkeit	0,1	8,00	9,00	9,00	8,00	9,00	7,00
Kosten Umsetzung	0,08	2,00	1,00	8,00	2,00	7,00	6,00
Ursachenbehebung	0,18	7,00	7,00	3,00	3,00	9,00	9,00
Machbarkeit	0,18	4,00	3,00	8,00	3,00	8,00	6,00
		4,74	5,32	5,38	5,28	7,86	6,34

Aus der Entscheidungsmatrix folgt, dass das segmentierte Einbringen eines Bahnzugs in den Randbereich am erfolgversprechendsten ist. Es muss die Funktion erfüllen eine separierte Dehnung in den Randbereich einzubringen. Dazu ist die Kalandranlage vor und nach dem Walzwerk durch Module zu ergänzen.

7.3 Funktionsweise und Aufbau des Anti-Wrinkle-Moduls

Der dem Kalandrieren hinzugefügte Prozess zur Wrinkle-Verringerung bringt in erster Linie einen neuen Parameter hinzu, der den auf den Randbereich wirkenden Bahnzug beschreibt. Abbildung 7-6 zeigt den Vergleich vom Prozess aus dem Stand der Technik zur neuen Prozessenerweiterung. Abgebildet ist die Elektrode im Bereich des Kalanderspalt. Im linken Abschnitt befindet sich die Elektrode im unkalandrierten Zustand und im rechten Bereich im kalandrierten Zustand. Die Dehnung in den Randbereich wird für jeden unbeschichteten Bereich in Bearbeitungsrichtung separat eingebracht. Um den Kalanderspalt herum, mit den Angriffslinien in Grün gestrichelt, erfolgt das Aufbringen von Zugkräften.

Nach dem Kalanderspalt weist der beschichtete Bereich für den Stand der Technik Prozess eine Verzerrung auf, die im unbeschichteten Bereich nicht vorhanden ist. Zu

erkennen ist dies am Längenunterschied der Segmente zueinander, dargestellt anhand der eingezeichneten Punkte. Der Unterschied wird durch die Prozesserweiterung behoben, indem dem Randbereich eine Kraft beaufschlagt wird, durch die sich die Dehnungen annähern. Mit der Annahme, dass die Elektrode bezogen auf die Beschichtungsbreite eine homogene Flächenbeladung besitzt und die Kalandrierung gleichmäßig über die Breite stattfindet, ist der neue Parameter Bahnzug für den Randbereich auf beiden Seiten identisch.

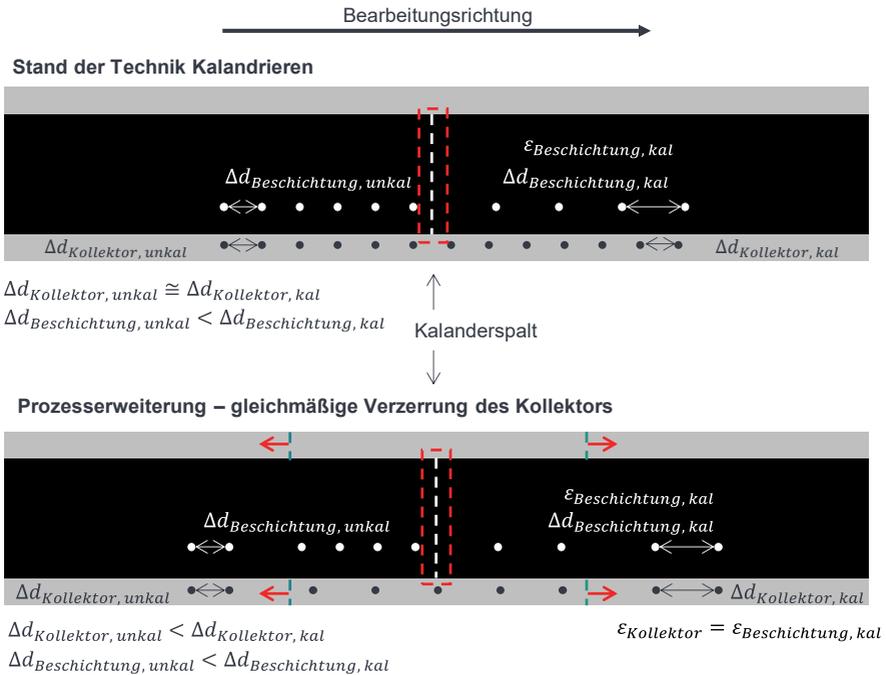


Abbildung 7-6: Funktionsweise der Prozesserweiterung

Der Prozessparameter Bahnzug im Randbereich muss für jedes Material und jede Zieldichte neu ermittelt werden, da die in die Beschichtung eingebrachten Verzerrungen unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Zur Parameterermittlung, siehe Abbildung 7-7, ist ein Vorversuch mit einer Kalandrierung nach dem Stand der Technik notwendig. Die gängigen Kalandrierparameter entsprechen dabei dem Betriebsoptimum. Dies gilt vor allem für die Elektrodendichte, die Kalendarwalzentemperatur und den erforderlichen

Bahnzug. Zwingend erforderlich ist, dass eine Verzerrungsmessung gemäß Kapitel 5.2 durchgeführt wird. Damit ist die Verzerrung an der Beschichtungsoberfläche und die dadurch eingebrachte plastische Dehnung ermittelt. Der Randbereich soll mit dem exakten Wert der plastischen Dehnung beaufschlagt werden. Dazu wird ein Zugversuch durchgeführt. Der zugehörige Kraftwert bei entsprechender plastischer Verformung entspricht dem Ausgangswert für den neuen Parameter. Abbildung 7-7 zeigt die dabei die angewandte Vorgehensweise, zur Erschließung des neuen Parameters.

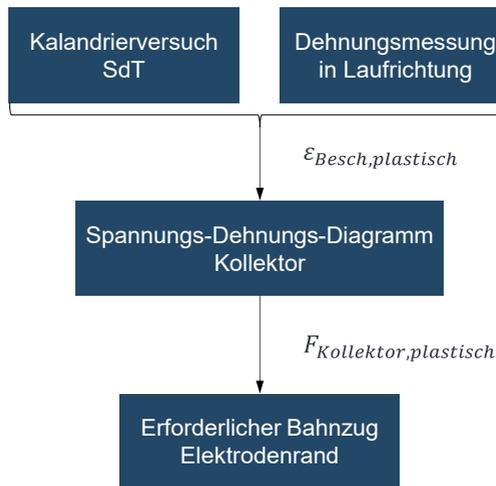


Abbildung 7-7: Parameterfindung für die Prozesserweiterung

Aus einer Zugversuchsserie werden über das aufgenommene Spannungs-Dehnungs-Diagramm die Materialkennwerte Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul und Bruchdehnung bestimmt. Für ein besseres Materialverständnis und zur Kontrolle der erhaltenen Dehnungswerte sowie zur Gültigkeitsprüfung in Abhängigkeit von dem Ort der Rissentstehung, wird die Zugprüfmaschine mit dem in Tabelle 5-8 beschriebenen Bildauswertungssystem GOM gekoppelt. Abbildung 7-8 zeigt beispielhaft für einen Versuch die Auswertung des Zugversuchs an einem Aluminiumkollektor. Die Zugversuchskurve beinhaltet fünf Proben, bei denen keine signifikanten Abweichungen zueinander zu erkennen sind. Die Analyse über die Bildverarbeitung zeigt die Dehnungswerte auf der Oberfläche der Zugprobe. Zu erkennen ist, dass die Dehnungswerte kurz vor dem Riss größer sind als die Dehnungswerte nach dem Riss. Die Differenz macht dabei die

elastische Dehnung aus. Die Auswertung erfolgt über ein Kraft-Dehnungs-Diagramm, durch das eine direkte Übertragung auf den Bahnzug für den Randbereich möglich ist. Zu beachten ist dabei die unter Umständen unterschiedliche Breite zwischen der Zugprobe und dem beschichtungsreifen Bereich.

Der Dehnungswert auf der Beschichtung aus dem Kalandrierversuch wird somit auf den Dehnungswert im Kraft-Dehnungs-Diagramm der Kollektorproben übertragen. Die plastische Verformung muss unterhalb der Bruchdehnung liegen.

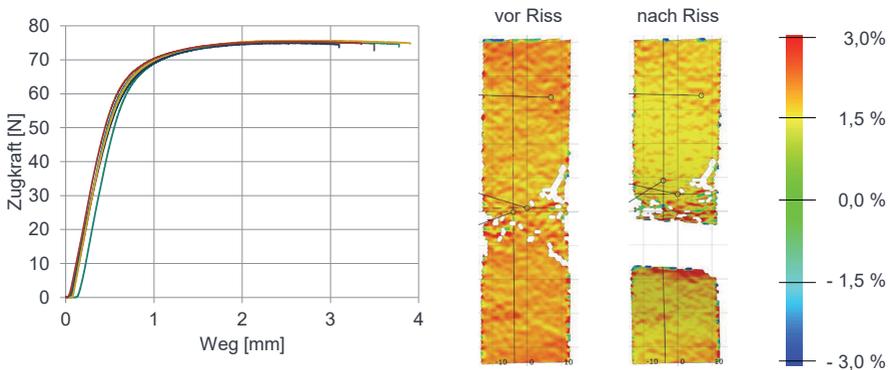


Abbildung 7-8: Auswertung eines Zugversuchs (aus (A_Bernecker 2021))

Die als Anti-Wrinkle-Modul bezeichnete Prozesserverweiterung, bringt einen zusätzlichen Parameter ein, der vorgibt, welcher Bahnzug allein im unbeschichteten Randbereich rund um den Kalanderspalt wirken soll. Abbildung 7-9 zeigt schematisch den Aufbau dieser Prozesserverweiterung, der im Weiteren als Anti-Wrinkle-Modul bezeichnet wird und über das Patent EP 4 016 664 A1 (Barthel & Bold et al. 2020) angemeldet wurde. Die Umsetzung der Randstreckung erfolgt über zusätzliche Rollen, die nur auf dem unbeschichteten Bereich greifen. Das Ziel ist keine weitere Verdichtung, sondern das Aufbringen einer Zugkraft. Die Rollen werden auf der Ober- und Unterseite sowie am Ein- und Auslauf über Motoren angetrieben, sodass eine präzise Einstellung der Zugkraft möglich ist. Die Antriebe regeln das Drehmoment, sowie die Geschwindigkeit der Rollen, wodurch es am Einlauf zu einer Bremswirkung und am Auslauf zu einer Zugwirkung kommt. In dem Aufbau sind die oberen Rollen fixiert, die unteren Rollen werden mit einer Zustellkraft an die oberen Rollen gedrückt. Die Zustellung des unteren Rollenpaares muss präzise erfolgen.

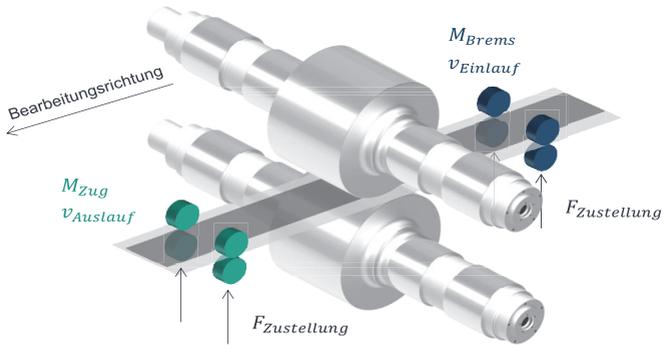


Abbildung 7-9: Schematische Darstellung des Anti-Wrinkle-Moduls

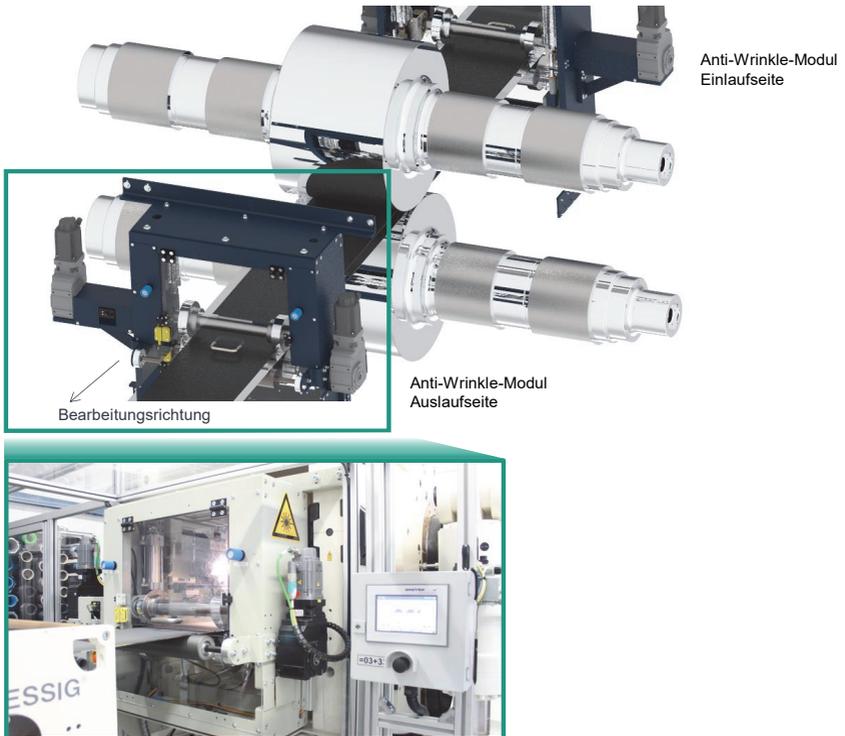


Abbildung 7-10: Umsetzung des Anti-Wrinkle-Moduls

Abbildung 7-10 zeigt den umgesetzten Prototyp im Gesamtkontext der Kalanderanlage. Die Module an der Einlaufseite wie an der Auslaufseite sind baugleich.

Im Detail ist ein Anti-Wrinkle-Modul in der Explosionsdarstellung in Abbildung 7-11 wiedergegeben. Das Gehäuse des Moduls ist fest mit der Kalanderstuhlung verschraubt. Die obere Achse ist über Lagerungen fest am Gehäuse des Anti-Wrinkle-Moduls und dadurch fest am Kalander angebracht. Angetrieben wird die Achse über einen Elektromotor, bestückt mit einem Getriebe. Neben einer Balgkupplung zum Verbinden der Achse der Motor-Getriebe-Einheit mit der Welle inklusive der Rollen, ist ein Drehmomentsensor verbaut. Über den Sensor wird der auf den Randbereich aufgebrachte Bahnzug geregelt. Die untere Achse ist ohne Balgkupplung und Sensor direkt an die Motor-Getriebe-Einheit angebunden. In dieser Konfiguration stellt die obere Welle somit auf der Steuerungsseite den Master dar und gibt der unteren Einheit die Drehzahl beziehungsweise das Drehmoment vor. Die untere Einheit hängt an zwei Pneumatikzylindern und wird im Betrieb gegen die obere Achse gedrückt. Auf beiden Achsen befinden sich die Rollen, die direkten Kontakt zur Elektrode haben und den Bahnzug übertragen. Die Rollen können axial auf der Welle verschoben werden, wodurch das Anti-Wrinkle-Modul sowohl an die Beschichtungsbreite als auch für mehrstreifige Beschichtungen, angepasst werden kann. Der Reibkoeffizient zwischen Folie und Rollen ist zur Bestimmung der notwendigen Normalkraft ermittelt. Die Rollenoberfläche muss eine sehr hohe Güte haben, damit sich Unebenheiten nicht in die Aluminiumfolie eindrücken und zu einem Versagen der Elektrode führen. Gleichzeitig muss die Zugkraft übertragen werden können. Aus diesem Grund sind die Rollenpaare so ausgewählt, dass sich auf der Oberseite eine Rolle mit polierter und verchromter Oberfläche befindet. Auf der Unterseite der Elektrode befindet sich eine Rolle mit gummierter Oberfläche. Zusätzlich zu den Rollen und deren Antrieben sind Umlenkwalzen eingebaut. Die Umlenkwalzen sollen die Elektrode von unten stützen, um einen planen und horizontalen Verlauf durch das Anti-Wrinkle-Modul zu gewährleisten.

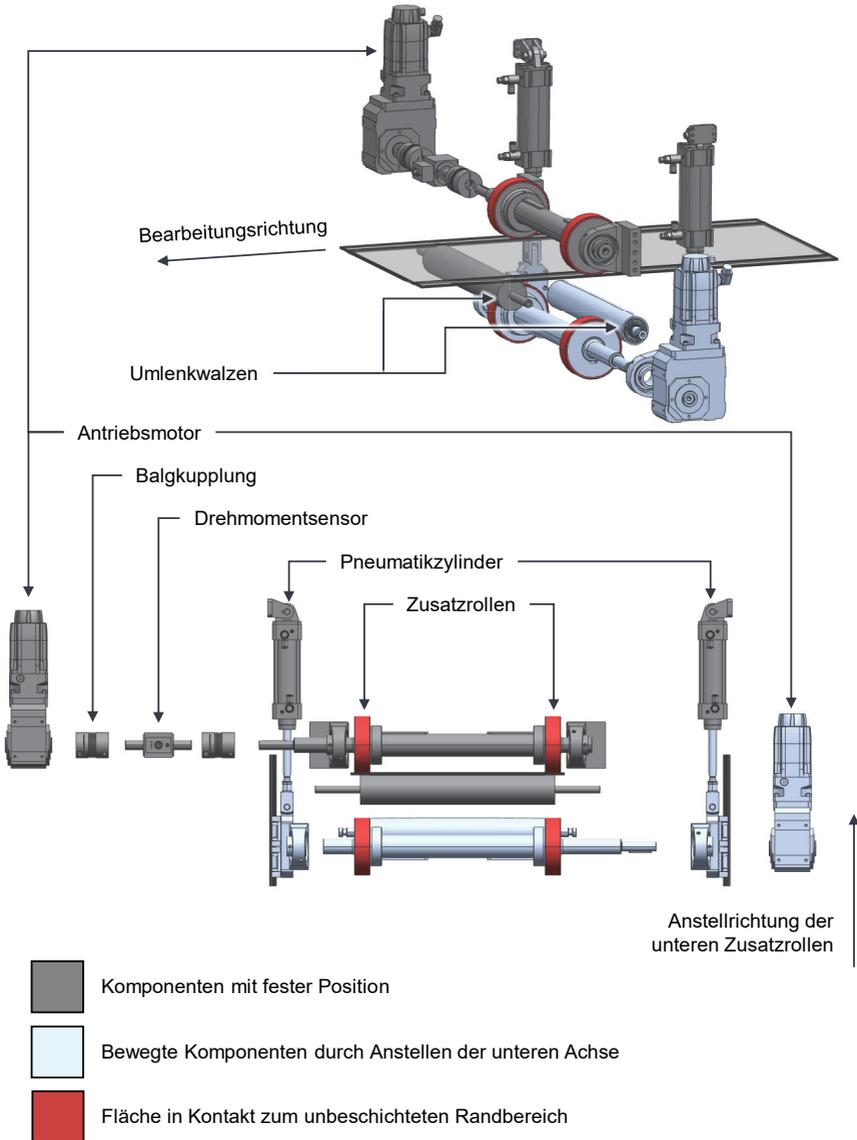


Abbildung 7-11: Detaillierte Darstellung des Anti-Wrinkle-Moduls

Die Geschwindigkeit an den Achsen kann mit einer Genauigkeit von 0,001 m/min angegeben werden. Dem Bahnzug wird ein Sollwert mit einer möglichen Schrittweite von 1 N vorgegeben. Zusätzlich können Regelgrößen der Elektromotoren angegeben werden. Die Module besitzen die Modi Geschwindigkeitsregelung, Zugregelung und indirekte Zugregelung. Die Geschwindigkeitsregelung nimmt den eingetragenen Wert als Sollgeschwindigkeit. Ebenso wird der Zugregelung der eingetragene Bahnzug als Sollwert übergeben. Der Unterschied zwischen der Zugregelung und der indirekten Zugregelung liegt in der Stellgröße. Für die Zugregelung erfolgt die Überprüfung des Bahnzugs über den Drehmomentsensor an der oberen Welle. Dem Motor wird der Sollwert korrigiert. Für die indirekte Zugregelung wird der Istwert für das Drehmoment des Elektromotors mit dem Sollwert verglichen und angepasst. Der Vorteil der indirekten Zugregelung ist zwar eine schnelle Reaktionszeit, aber das erfasste Drehmoment ist von der eigentlichen Angriffsstelle weiter entfernt. Im Gegensatz dazu kann die Zugregelung genauer agieren, wenn auch mit höheren Verarbeitungszeiten.

Dem Anti-Wrinkle-Modul kann die Geschwindigkeit des Kalanders vorgegeben werden, wodurch eine synchrone Beschleunigung erfolgt. Des Weiteren wird der Notaus als Signal übertragen, das Stoppen der Linie sowie weitere Parameter, die einen Maschinenstopp verursachen.

Im Kalandrierbetrieb wird der Zustand aus Abbildung 7-6 erreicht. Hierbei erfolgt das Einstellen eines Bahnzugs, wie oben beschrieben, an den Modulen an der Ein- und Auslaufseite des Kalanders. Die Einstellung erfolgt über die Zugregelung. Zu beachten ist dabei, dass die Normalkraft homogen übertragen werden muss, wodurch dem Rundlauf der Rollen eine wichtige Rolle zukommt. Am Anti-Wrinkle-Modul an der Einlaufseite wird eine Zugkraft entgegen der Bearbeitungsrichtung vorgegeben. Die Geschwindigkeit wird von der Kalandranlage an die Module übertragen. An der Auslaufseite ist eine Zugkraft in Bearbeitungsrichtung vorgegeben. Aus diesem Grund haben die Rollen am Einlauf eine geringfügig geringere Geschwindigkeit als die Kalandriergeschwindigkeit. Am Auslauf ist die Geschwindigkeit geringfügig höher. Der Bahnzug auf den unbeschichteten Randbereich ergibt sich aus der Summe der Kräfte zwischen dem Modul an der Einlaufseite und an der Auslaufseite. Dieser Zustand entspricht einem konstanten Kalandrierbetrieb inklusive Anti-Wrinkle-Modul.

Herausfordernd ist das Anfahren der Kalandrierlinie inklusive Anti-Wrinkle-Modul, da der Zustand der Elektrode vom Kalanderspalt zum Anti-Wrinkle-Modul auf der Auslaufseite vorerst unkalandriert vorliegt. In der Zeitspanne, in der sich die Startkante des

kalandrierten Materials vom Kalanderspalt zum Auslauf bewegt, verändert sich das Verhältnis aus unkalandriertem und kalandriertem Bereich stetig. Zur Bewerkstelligung dieser Herausforderung ist das Vorgehen in Abbildung 7-12 für eine Kalandriergeschwindigkeit von 1 m/min dargestellt. Unmittelbar nach dem Kalandrierbeginn werden die Rollen am Einlauf mit einer geringfügig geringeren Geschwindigkeit (Faktor = 99 %) im Vergleich zur Kalandriergeschwindigkeit zugeschaltet. Damit wird das Voreilen des unbeschichteten Randbereichs verhindert. Sobald der kalandrierte Bereich das Anti-Wrinkle-Modul am Auslauf erreicht hat, mit einem Abstand von 1344 mm zum Kalanderspalt, werden die Rollen am Anti-Wrinkle-Modul an der Auslaufseite zusammengefahren. Erforderlich ist mit der Zuschaltung der Rollen am Auslauf eine Umstellung auf die Zugregelung, damit eine kontrollierte Verzerrung in den Randbereich eingebracht werden kann. Eine optimierte Lösung ist dabei, die Rollen am Auslauf bereits zum Zeitpunkt t_3 zuzuschalten und im Zeitraum zwischen t_3 und t_4 die Zugkraft über das Modul an Einlauf- wie auch Auslaufseite über eine Rampe zu erhöhen. Im Anschluss daran erfolgt der Regelbetrieb mit konstanten Zugkräften. Beim Maschinenstopp werden die Kalandrierwalzen wie auch die zusätzlichen Rollen zeitgleich auseinandergefahren.

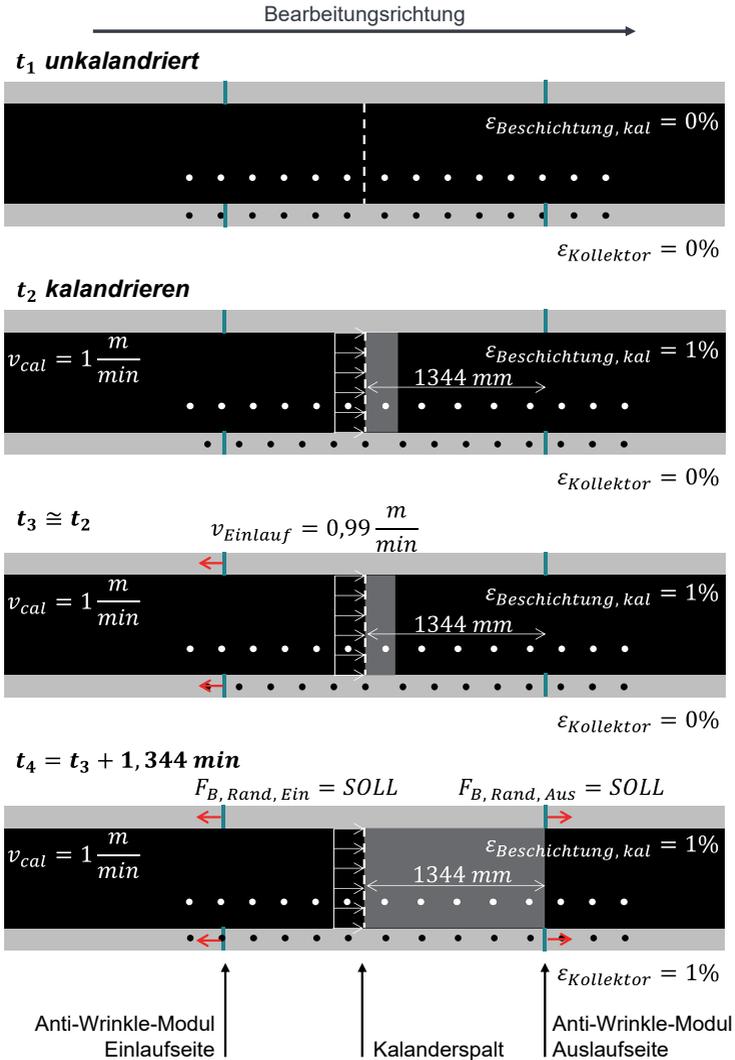


Abbildung 7-12: Anfahrbetrieb der Kalandrierlinie inklusive Anti-Wrinkle-Modul

8 Validierung

8.1 Nachweis der Vermeidung der Wrinkle-Bildung mit dem Anti-Wrinkle-Modul

Eine optimierte Parameterkombination aus Linienlast und Erreichen der Zieldichte bildet die Grundlage für den experimentellen Nachweis der Wrinkle-Minimierung. Gemäß der Vorgehensweise in Abbildung 7-7 erfolgt das Kalandrieren mit hoher Kalandrierwalzentemperatur und hohem Bahnzug mit und ohne Zusatzverfahren. Die Kalandrierwalzentemperatur wird auf ein Maximum von 90°C gebracht, der Bahnzug auf 80 N und die Zieldichte liegt bei 3,5 g/cm³. Zum Einsatz kommt die Elektrode mit dem Aktivmaterial NMC 811 und einer Beladung von 20,8 mg/cm².

Tabelle 8-1 stellt die Änderungen dar, die durch das Anti-Wrinkle-Modul im Prozess entstehen. An der Zieldicke und der Zieldichte ändert sich nichts. Sofern erforderlich und elektrochemisch sinnvoll, können die Zieldichte und die Zieldicke jedoch auch erhöht werden. Weiterhin ist zu beachten, dass mit einer Maximierung der Zieldichte die Handhabbarkeit der Elektrode aufgrund des steigenden Elastizitätsmoduls mit geringerer Bruchdehnung schwieriger wird. Die Haftkraft erfährt keine Änderungen und bleibt hauptsächlich von der Dichte und der Binderverteilung abhängig. Lediglich das Haftkraftverhalten im Randbereich wird durch die fehlenden Wrinkles verbessert und auf ein Niveau mit der Haftkraft im beschichteten Bereich gebracht. Das Betriebsoptimum für die Kalandrierparameter ändert sich nicht. Vor allem die Linienlast orientiert sich an der zu erzielenden Zieldichte. Dennoch besteht weiterhin die Anstrengung darin, die Linienlast so gering wie möglich zu halten, um die Belastung auf das Material zu verringern. Das wird durch eine Erhöhung der Kalandrierwalzentemperatur erhöht.

Die ersichtlichsten Unterschiede zeigen sich an den Elektrodendefekten. Die Wrinkle-Bildung, gemessen an der Summe der Wrinkle-Länge, wird stark vermindert. Durch die eingebrachte Dehnung in den Randbereichen wird der Dehnungszustand über die Elektrodenbreite homogen. Daraus resultierend verringert sich zusätzlich die Wellenbildung an der Elektrode.

Tabelle 8-1: Änderungen durch den Einsatz des Anti-Wrinkle-Moduls

	Stand der Technik	Bearbeitung mit Anti-Wrinkle-Modul
d	Zieldicke	Zieldicke - Minimierung
F_{Haft}	Kohäsionsbruch	Kohäsionsbruch sowie Verbesserungen im Randbereich
ρ_A und ρ_B	Zieldichte	Zieldichte – Maximierung
$x_{Kalandrier}$	Zielparameter	Zielparameter
q_L	Minimal mögliche Linienlast	Minimal mögliche Linienlast
w	ausgeprägte Wrinkles	minierter Wrinkle-Bildung
ε	Verzerrung der Beschichtung	Homogene Verzerrung

Die Ergebnisse der Kalandrierung inklusive dem Anti-Wrinkle-Modul zeigen die erwünschte Wirkung der Einbringung einer Verzerrung in den unbeschichteten Randbereich und daraus resultierend eine Verhinderung der Wrinkle-Bildung. Ausgewählte Versuchsergebnisse zeigen den Unterschied in der Verarbeitung mit und ohne Anti-Wrinkle-Modul. Die Versuche werden unmittelbar nacheinander durchgeführt, sodass Umwelteinflüsse, zum Beispiel die Dauer der Aufheizphase der Kalandrierwalzen, ausgeschlossen sind.

Abbildung 8-1 zeigt die Wrinkle-Messung mit und ohne den Einsatz des Anti-Wrinkle-Moduls im Vergleich. Zusätzlich sind die Messwerte in Tabelle 8-2 aufgeführt. Die Aufnahme im Stand der Technik Prozess beinhaltet 13 Wrinkle. In der Wrinkle-Aufnahme ist stets ein Teil der Beschichtung detektiert, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, damit auf eine Referenzkante Bezug genommen werden kann. Am Beschichtungsrand lässt sich die Welligkeit der Elektrode erkennen. Die Wrinkle-Ausbildung bei Verwendung des Anti-Wrinkle-Moduls zeigt eine Reduzierung der Wrinkle auf sechs und eine Verkürzung der Wrinkle-Länge von rund 20 mm auf 15 mm. Der Beschichtungsrand weist keine Welligkeit auf. Durch den Eingriff der zusätzlichen Rollen sind deutliche

Verbesserungen zu erkennen. Die Wrinkle-Anzahl als auch die Wrinkle-Länge nehmen ab. Das Ergebnis zeigt folglich keine vollständige Behebung der Wrinkle-Bildung, aber eine starke Verminderung. Zu beachten ist, dass die Aluminiumfolie unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt ist, wobei die Folie eine Verzerrung aufgrund der Verschiebung der Beschichtung erfährt. Dabei werden die Partikel, wie in Abbildung 5-3 dargestellt, in die Aluminiumfolie hineingedrückt. Die Parameter am Anti-Wrinkle-Modul orientieren sich an der gemessenen Dehnung auf der Beschichtungsfläche, sodass nicht zwingend die gesamte Beanspruchung der Aluminiumfolie bekannt ist. Bedingt durch die mechanischen Eigenschaften der Aluminiumfolie und die erforderliche Streckung im Randbereich sind der Wrinkle-Vermeidung jedoch Grenzen gesetzt.

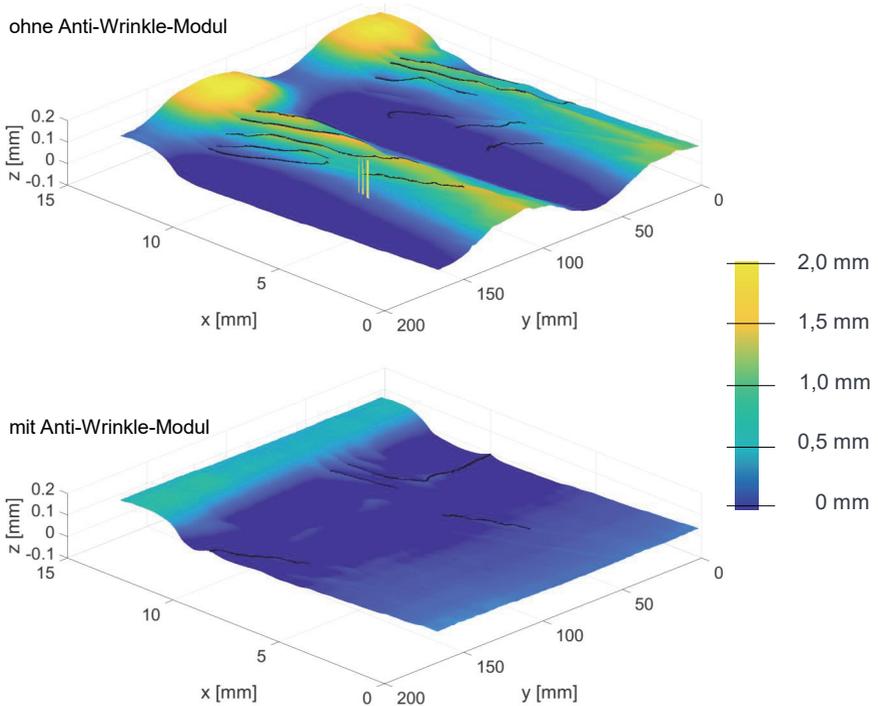


Abbildung 8-1: Vergleichende Wrinkle-Messung

Tabelle 8-2: Wrinkle-Messwerte

	Wrinkle-Anzahl	Mittelwert Wrinkle-Länge [mm]	Mittelwert Wrinkle-Höhe [mm]	Mittelwert Wrinkle-Winkel [deg]
ohne Anti-Wrinkle- Modul	13	19,32	0,10	168,28
mit Anti-Wrinkle- Modul	6	15,43	0,04	170,07

Abbildung 8-2 visualisiert die Ergebnisse der Dehnungsmessung für eine Verarbeitung mit und ohne Anti-Wrinkle-Modul. Die Aufnahmen zeigen die Hauptdehnungen gemäß Formel 5-8. Die Verzerrungsmessung im Prozess nach aktuellem Stand der Technik zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen der eingebrachten Dehnung im beschichteten Bereich und den beschichtungsfreien Rand. Die Hauptdehnungen der Aufnahme inklusive Anti-Wrinkle-Modul zeigen, dass eine Dehnung in den Randbereich eingebracht ist. Zudem sind die Dehnungen über die gesamte Elektrodenbreite homogen.

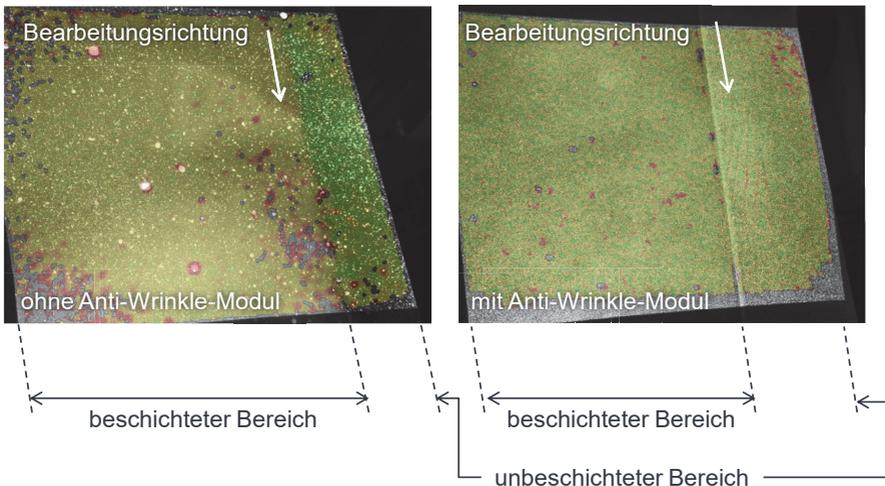


Abbildung 8-2: Dehnungsmessung im Vergleich

Ein weiterer positiver Effekt der Verarbeitung mit dem Anti-Wrinkle-Modul ist die Verringerung der Wellenbildung. Die Wellen sind über die Abweichung der Elektrode in z-Richtung zu einer Referenzebene in den Aufnahmen in Abbildung 8-3 zu erkennen. Der Verzug führt zu einer Wellenbildung, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, sodass die Wellen in der Beschichtung das globale Maximum darstellen. Das Eingreifen des Anti-Wrinkle-Moduls führt zu einer geringeren Wellenbildung und damit zu einem besseren Anliegen der Elektrode an den Umlenkwalzen. Wodurch zusätzlich der Elektrodendefekt aus Abbildung 3-9 verringert werden kann.

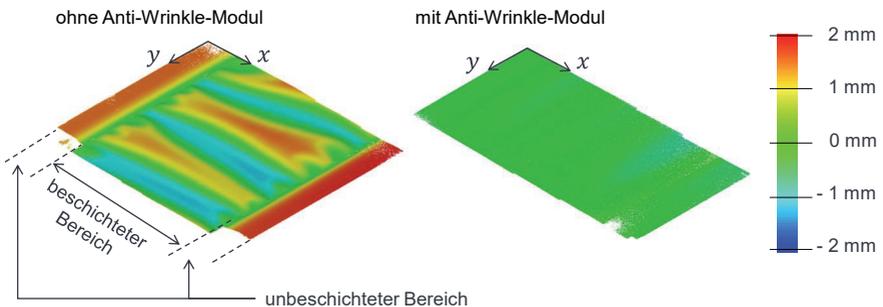


Abbildung 8-3: Wellenbildung im Vergleich

Die verminderte Wrinkle-Bildung und die verringerte Wellenbildung sorgen für eine Elektrode, die eben vorliegt. Dadurch ist die Folienführung und das Umlenken an den Leitwalzen verbessert. Das Risiko von Materialabplatzungen oder Folienrissen wird damit minimiert. Weiterhin zeigen die unbeschichteten Randbereiche weniger Defekte auf, sodass das Fügen der Ableiter der Elektrodensheets zueinander mit einer höheren Prozessstabilität möglich ist.

8.2 Bewertung des Anti-Wrinkle-Moduls

Die Experimente mit der zusätzlichen Wirkung des Anti-Wrinkle-Moduls in Kapitel 8.1 zeigen die erfolgreiche Verminderung der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Kathoden mit hohen Dichten. Nichtsdestotrotz bringt das Zusatzverfahren Herausforderungen mit sich.

Die Zugkraftverteilung innerhalb der Elektrode ist in Abbildung 8-4 über einen Freischnitt dargestellt. Die Momentaufnahme für den Regelbetrieb wird über eine FEM-Simulation nachgestellt. Der Kalanderspalt stellt ein Festlager dar. An den Stellen, an

denen das Anti-Wrinkle-Modul angreift, ist die Bewegung der Elektrode nur in die z-Richtung begrenzt. An den Angriffslinien der Anti-Wrinkle-Module sind Zugkräfte mit entsprechender Richtung implementiert. Die Umlenkwalzen vor dem einlaufseitigen Modul und hinter dem auslaufseitigen Modul bringen über die gesamte Materialbreite einen Bahnzug auf die Elektrode, sodass diesen Stellen ebenso Zugkräfte vorgegeben werden. Das Simulationsergebnis in Abbildung 8-4 zeigt den Dehnungszustand der Elektrode. Das Aufbringen des Bahnzugs auf den Randbereich führt in jedem Fall zu einer ungleichmäßigen Bahnzugverteilung. Die Folge ist, dass zwischen dem Kalanderspalt und den jeweiligen Modulen ein Einschnüren zu erkennen ist. Die Einschnürung führt zu einem Übereinanderschlagen der Elektrode am Übergang vom beschichteten zum unbeschichteten Bereich, dargestellt in Abbildung 8-4.

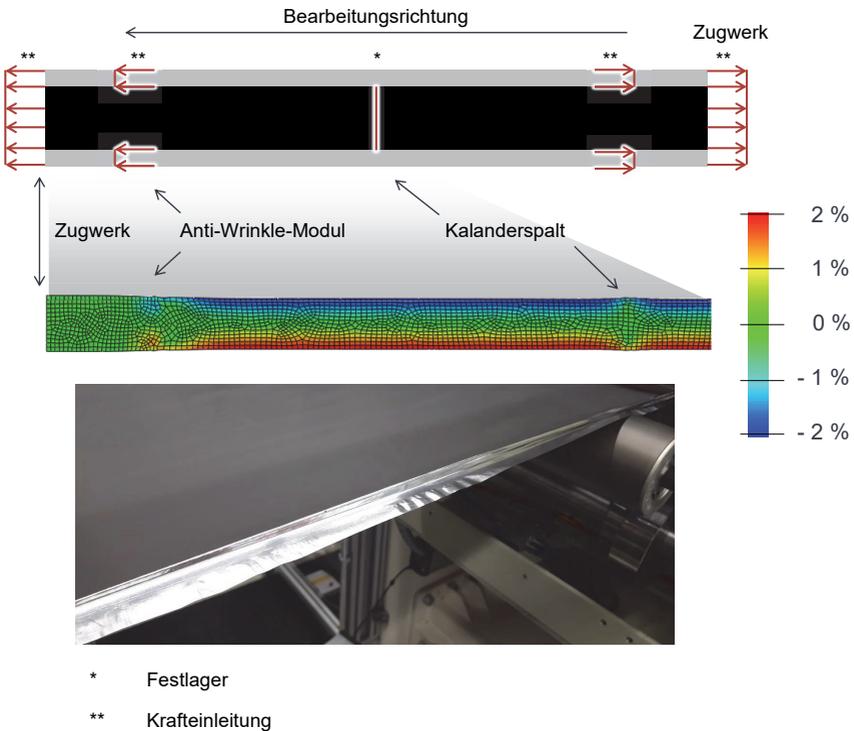


Abbildung 8-4: Materialspannungsverteilung und resultierende Faltenbildung der Elektrode am Anti-Wrinkle-Modul (z.T. aus (A_Türke 2021))

Als Gegenmaßnahme muss eine Querkraft die Elektrode in die Breite ziehen. Eine Möglichkeit dafür sind bombierte Umlenkwalzen, die die Elektrodenbahn quer zur Bearbeitungsrichtung strecken. Eine gummierte Rolle kann mit einer Spirale versehen werden, sodass über deren Kontur eine Querkraft erzeugt. Des Weiteren sind freie Längen zwischen den Angriffspunkten zu reduzieren, wodurch die Freiheitsgrade der Elektrode beschränkt werden.

Eine weitere Herausforderung ist, die Belastbarkeit der beschichteten Elektrode nicht unbeachtet zu lassen. Die durch das Anti-Wrinkle-Modul auftretenden Spannungsspitzen rund um die Eingriffsstelle der Rollen verteilen sich in den beschichteten Bereich jeweils an Ein- wie auch Auslaufmodul. Zur Beurteilung der Belastbarkeit sind Zugversuche im unkalandrierten und im kalandrierten Zustand durchgeführt, siehe Abbildung 8-5. Für die Kathode mit dem Aktivmaterial NMC 622 aus den Versuchsreihen ist der Vergleich zwischen den drei Zuständen unbeschichtet, unkalandriert und kalandriert dargestellt. Die unkalandrierten Proben weisen im Vergleich zum Stromsammelner eine höhere Zugkraft auf, da die Beschichtung den Kollektor verstärkt. Die kalandrierten Proben haben ein sprödes Materialverhalten, da das Kalandrieren Materialspannungen in den Materialverbund einbringt. Die Zugkraft ist im Vergleich zur unkalandrierten Probe kleiner. Dementsprechend muss für die zulässige Zugkraft am Anti-Wrinkle-Modul an der Auslaufseite der beschichtete Bereich ebenfalls berücksichtigt werden.

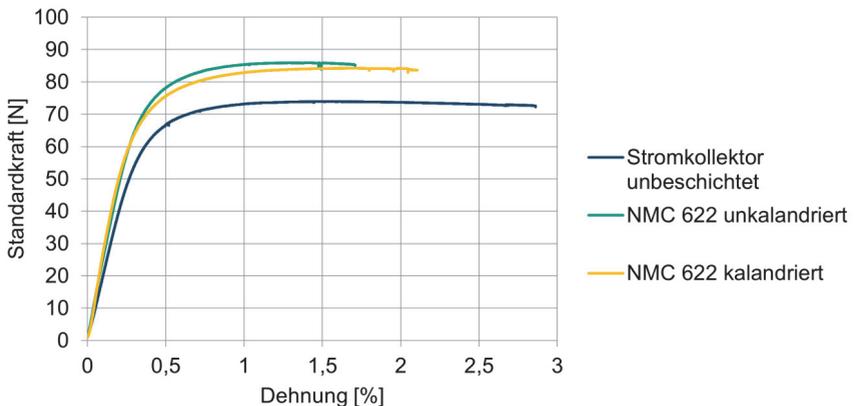


Abbildung 8-5: Ergebnisse aus Zugversuchen

Zusammenfassend ist für den Betrieb des Anti-Wrinkle-Moduls die eingebrachte Verzerrung in die Beschichtung durch den Kalandriervorgang maßgebend für den einzustellenden Bahnzug an den Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls. Von großer Bedeutung sind die Materialeigenschaften der Elektrode, sodass vor der Bearbeitung das Risiko der Rissbildung bewertet werden kann. Risse entstehen, wenn die einzubringende Verzerrung die Bruchdehnung der kalandrierten Probe überschreitet. Eine Übersicht über die einstellbaren Prozessparameter des Anti-Wrinkle-Moduls ist in Abbildung 8-6 dargestellt. Das Betriebsoptimum zur Übertragung der notwendigen Zugkraft entsteht durch die optimale Kombination der Maschinenparameter Zustellkraft der Rollen zueinander und der Geschwindigkeit der Rollen oder dem vorgegebenen Bahnzug. Einen Einfluss auf die übertragbare Zugkraft hat dabei der Reibwert zwischen den Rollen und dem unbeschichteten Randbereich.

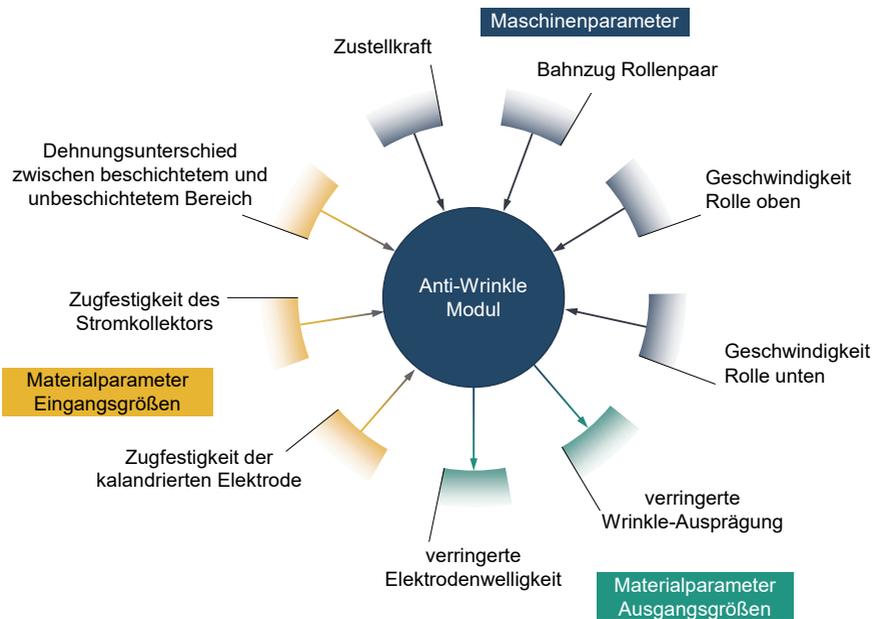


Abbildung 8-6: Prozess- und Materialgrößen für das Anti-Wrinkle-Modul

Sowohl die experimentellen Ergebnisse als auch die Simulationsergebnisse sind materialabhängig. Eine Veränderung des Aktivmaterials, des Bindersystems oder der Kollektorfolie in ihrer Stärke und Legierung haben einen Einfluss auf die Wrinkle-Ausprägung. Das Anti-Wrinkle-Modul bietet dennoch genügend Freiheitsgrade, um auf die unterschiedlichen Materialien, Elektrodenformate und Zieldichten eingestellt werden zu können und wie in Kapitel 8.1 gezeigt, die Elektrodendefekte zu minimieren.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Der Fortschritt dieser Arbeit zeigt sich auf dem Forschungsgebiet der Elektrodenproduktion für Lithium-Ionen-Batterien. Bei den Untersuchungen wurde zum einen neues Wissen um die mechanischen Eigenschaftsänderungen einer Elektrode beim Kalandrieren gewonnen. Zum anderen wurde der Prozessschritt Kalandrieren weiterentwickelt, um dem Elektrodendefekt Wrinkle entgegenzuwirken. Die Vorgehensweise und die Methodik zur detaillierten Ursachenfindung der Entstehung des Elektrodendefekts Wrinkle stand dabei im Fokus.

Allgemein gilt es, die Kapazität und die Lebensdauer von Batteriezellen zu maximieren. Bestimmend dafür sind die ausgewählten Materialien, als auch der Einfluss der Fertigung der Batteriezelle. Vor allem die Elektrodenproduktion mit den Prozessschritten Mischen, Beschichten, Trocknen und Kalandrieren sind maßgeblich für die Qualität einer Batteriezelle. Eine Elektrode entspricht einem Materialverbund aus der Beschichtung und dem dazwischenliegenden Stromsammler. Das Kalandrieren von Batterieelektroden ist ein entscheidender Prozessschritt zur Einstellung der Energiedichte. Über den Walzprozess wird die volumetrische Energiedichte der Beschichtung bestimmt, indem das Material verdichtet wird.

Die dabei einstellbaren Prozessparameter für das Kalandrieren sind die Linienlast, die Kalandrierwalzentemperatur und der Bahnzug. Die Linienlast wird über den Verdichtungswiderstand des Materials und die Zieldichte bestimmt. Je höher die Kalandrierwalzentemperatur, desto geringer fällt die Linienlast und somit die Belastung für die Beschichtung aus. Der Bahnzug ist für die Prozesskontrolle von Bedeutung, sodass eine stabile Materialhandhabung, vor allem bei hohen Geschwindigkeiten, möglich ist. Aus dem Gesichtspunkt der Verdichtung, stellt eine hohe Kalandrierwalzentemperatur und ein hoher Bahnzug ein Betriebsoptimum für das Kalandrieren dar.

Die Zielparame-ter, wie die Zieldichte, werden materialseitig festgelegt, wobei dabei die Fehlerentstehung nicht außer Acht gelassen werden darf. Die Elektrodenkomponenten Beschichtung und Kollektor haben unterschiedliche Materialeigenschaften, sodass das Verdichten zu Inhomogenitäten führt und folglich zu Defekten. Ein typischer Defekt sind Falten im Übergangsbereich von der Beschichtung zu der Kollektorfolie. Diese sogenannten Wrinkles haben einen Einfluss auf die nachfolgenden Prozessschritte. Es kann

zu einem Abplatzen der Beschichtung kommen, wie auch zu fehlerhaften Fügestellen beim Schweißen der Ableiterfahnen zueinander.

Der Elektrodendefekt Wrinkle muss im Detail verstanden werden, um Gegenmaßnahmen definieren zu können. Es erfolgen experimentelle Untersuchungen, um die eigentliche Ursache der Wrinkle-Bildung zu erarbeiten. Der Fokus liegt dabei auf der Verwendung von Kathoden, welche durch eine höhere Sprödigkeit im kalandrierten Zustand verglichen zur Anode die größte Herausforderung für die Produktionsprozesse darstellen. Die verwendeten Materialien entsprechen dem aktuellen Stand der Technik. Die Anlagenparameter variieren bezüglich der Kalandrierwalzentemperatur, dem Bahnzug und der Bearbeitungsgeschwindigkeit, wobei die maximal sinnvolle Dichte erreicht werden muss.

Die Experimente werden über statistische Versuchspläne aufgestellt. Die Versuchsergebnisse sind die Änderungen der mechanischen Eigenschaften der Elektrode, wobei die Methoden dazu im Vorfeld zur Versuchsdurchführung entwickelt wurden. Aufgenommen werden dabei die geometrischen Größen eines Winkles und die Verzerrung der Beschichtungsoberfläche. Zum Einsatz kommen ein Linienlaser sowie Kamerasysteme. Herausfordernd in der Bildverarbeitung sind die spiegelnde Oberfläche kalandrierter Elektroden. Zum gesamtheitlichen Prozessverständnis gehören zu den Versuchsergebnissen die Elektrodendicke, die erzielte Dichte, das Flächengewicht sowie die Haftfestigkeit als aufgenommene Materialkennwerte.

Das Resultat der Experimente ist, dass das Betriebsoptimum für das Kalandrieren von Elektroden mit einer hohen Kalandrierwalzentemperatur, als auch mit einem hohen Bahnzug zu erreichen ist. Diese Einstellungen verstärken jedoch die Wrinkle-Bildung. Die Ursache in der Wrinkle-Bildung liegt darin begründet, dass der beschichtete Bereich, gemäß den Grundlagen zu Walzprozessen, nicht nur eine Stauchung, sondern auch eine Verschiebung in und quer zur Bearbeitungsrichtung erfährt. Der unbeschichtete Bereich bleibt durch den Walzvorgang unberührt, sodass es zu einer Dehnungsdifferenz zwischen dem beschichteten und dem unbeschichteten Bereich kommt. Eine hohe Kalandrierwalzentemperatur fördert die Verzerrung der Beschichtung auf dem Stromsammelr, sodass eine verstärkte Wrinkle-Bildung zu beobachten ist. Ein erhöhter Bahnzug fördert den Längenunterschied zwischen dem beschichteten und dem unbeschichteten Bereich, sodass ebenfalls eine stärkere Wrinkle-Ausprägung die Folge ist. Folglich ergibt sich die negative Korrelation, dass es entweder ein Betriebsoptimum

oder eine verringerte Wrinkle-Bildung gibt. Über eine Modellbildung wird eine Verallgemeinerung der Versuchsergebnisse gewonnen.

Die negative Korrelation in der Prozessoptimierung kann lediglich über technische Maßnahmen gelöst werden. Mit dem Wissen um die eigentliche Ursache der Wrinkle-Bildung, können die Anforderungen an eine Vermeidung der Wrinkle-Bildung definiert werden. Demnach muss die Gegenmaßnahme die Ungleichheiten in der Elektrode kompensieren und dadurch eine Verzerrung in den unbeschichteten Randbereichen hervorrufen. Die Umsetzung der Gegenmaßnahme sieht dabei die Einbringung eines Bahnzuges über Rollen in den unbeschichteten Randbereich vor. Das Anti-Wrinkle-Modul ist über Rollenpaare, die jeweils symmetrisch um den Kalanderspalt angeordnet sind, aufgebaut. Es wirkt dabei jeweils eine Bremskraft vor den Kalandervalzen und eine Zugkraft nach den Kalandervalzen. Über die Wahl der wirkenden Kräfte kann die eingebrachte plastische Dehnung in den unbeschichteten Randbereich bestimmt werden, sodass der Spannungszustand der Elektrode nach dem Kalandrieren über die gesamte Elektrodenbreite homogen ist.

Das Ergebnis der Kalandrierung inklusive Anti-Wrinkle-Modul ist eine Elektrode mit homogener Dehnung. Die Qualitätssicherungsmethoden zur Wrinkle- und Verzerrungsdetektion dienen schlussendlich nicht nur zum Verständnis, sondern vor allem zur Verifizierung der Ergebnisse. Es erfolgt nicht nur der Nachweis, dass die Elektrode gleichmäßig beansprucht, sondern auch, dass die Wrinkle-Bildung minimiert ist. Das Kalandrieren von Batterieelektroden ist somit mit verbesserter Qualität möglich und verhindert dadurch Herausforderungen in den nachfolgenden Prozessschritten. Die Limitierung zwischen der erreichbaren Zieldichte und Batteriezellkapazität aufgrund des Elektrodendefekts Wrinkle sind damit aufgehoben.

9.2 Ausblick

Das Anti-Wrinkle-Modul stellt eine Erweiterung für den Prozessschritt Kalandrieren dar und ermöglicht damit weiterführende Forschungsfragen zu beantworten. Zusätzlich stellt der Wissensgewinn über die Versuchsreihen und die entwickelten Sensorsysteme einen Fortschritt auf dem Gebiet des Kalandrierens von Batterieelektroden dar. Es ist somit ein neuer Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen geschaffen.

Das Anti-Wrinkle-Modul an sich kann in seiner Ausführung weiterentwickelt werden. Dazu gehört der beschriebene Effekt des Überlappens der Elektrode im Randbereich, siehe Abbildung 8-4. Eine Verbesserung dessen lässt sich durch konstruktive

Maßnahmen systematisch untersuchen und beheben. Weitere Ansätze zum Ausbau des Anti-Wrinkle-Moduls können aus einer Kombination der Teilansätze aus Tabelle 7.1 umgesetzt und getestet werden. Weitere Fortschritte sind dabei über die Kombination eines wirkenden Bahnzugs und dem Einbringen von Wärme möglich.

Das Zusammenspiel des Anti-Wrinkle-Moduls mit dem Kalandrierprozess ist über ein Modell abbildbar. Hierzu gehören die Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern des Anti-Wrinkle-Moduls, den Kalender- und den Materialparametern. Ein Modell stellt die Grundlage für eine Regelung zwischen der Kalenderanlage und dem Anti-Wrinkle-Modul dar.

Eine Quantifizierung der Wrinkles lässt eine exakte Bezifferung des Elektrodendefektes zu. Eine Darstellung der Zusammenhänge zu den Kalandrierprozessparametern und den Materialeigenschaften ist somit ohne weiteres möglich. Mit Blick auf die nachfolgenden Prozessschritte ist eine Einteilung der Wrinkles in Kategorien hilfreich. Eine pauschale Aussage zur Güte der Elektrode allein mit der geometrischen Beschreibung der Wrinkles lässt sich aufgrund der Vielzahl an weiteren Einflüssen im Allgemeinen nicht treffen. Wrinkles und die dazugehörige Wellenbildung beeinflussen die Vereinzelung der Elektrode zu Elektrodenblätter bezüglich der Formstabilität und der Schnittkantenqualität. Für die Stapelgenauigkeit stellt die Welligkeit einzelner Sheets ebenfalls ein Risiko dar. Im nachfolgenden Prozessschritt zum Fügen der Ableiter können Wrinkles für Ungenauigkeiten oder einen Funktionsverlust der Fügestelle sorgen. Liegen die Ableiterfahnen aufgrund der Falten nicht plan übereinander, kann das Ultraschallschweißen nicht prozesssicher durchgeführt werden. Es ist zu untersuchen inwiefern sich die unterschiedlichen Wrinkle-Ausprägungen, mit und ohne Wirkung des Anti-Wrinkle-Moduls, auf die Qualitätsgrößen der nachfolgenden Prozessschritte Vereinzeln, Stapelbildung und Fügen der Ableiter auswirken. Denn Wrinkles lassen sich nach ihrer Größe in Kategorien einteilen, sodass dadurch am Kalandrierprozess ohne Zwischenprüfung über die Weiterverarbeitung entschieden werden könnte. Somit ist eine gesamtheitliche Betrachtung des Defekts Wrinkle vonnöten. Das heißt es ist zu prüfen, welcher Fehlergrad noch erlaubt ist und welche Einbußen bei geringerer Fehlerausprägung zu erwarten sind.

Das zur Detektion der Wrinkles eingesetzte Sensorsysteme hat auch das Potential zur Erkennung weiterer Defekte genutzt zu werden. Hierzu gehören Falten jeglicher Art, zum Beispiel Längsfalten, siehe Abbildung 3-9.

Auf der Materialseite wurde eine Verifizierung des Anti-Wrinkle-Moduls mit einstreifig durchgehend beschichteten Kathoden durchgeführt. Das Elektrodenlayout und das damit verbundene Zellformat sind in Abbildung 2-8 diskutiert. Für eine Serienproduktion mit durchgehender Beschichtung wird die Beschichtung sowie das Kalandrieren mehrstreifig gestaltet, sodass nicht nur im Randbereich sondern auch in den innenliegenden unbeschichteten Bereichen Wrinkles entstehen. Die Funktion und das Prinzip des Anti-Wrinkle-Moduls sollten auch für Konfigurationen solcher Art greifen. Hierzu benötigt es ein Rollenpaar am Ein- und Auslauf für jeden unbeschichteten Bereich. Konstruktiv muss die Zuführung der unteren Achse sehr präzise umgesetzt sein, um sicherzustellen, dass über alle Rollenpaare die gleiche Zugkraft übertragen wird. Weiterhin stellt der allgemeine mechanische Spannungszustand der Elektrode, vergleichend zu Abbildung 8-4, einen eigenen Untersuchungsgegenstand für mehrstreifige Beschichtungen dar. Über den Eingriff mehrerer Rollenpaare treten eine größere Anzahl an Zugkräften auf wodurch die Belastung für die Elektrode höher ist. Das in Kapitel 8.2 angesprochene Überlappen könnte sich reduzieren, da die gesamte Elektrode über die gesamte Breite eine größere Anzahl an Stützpunkten erhält.

Nicht nur das Elektrodenlayout, sondern auch die Materialzusammensetzung haben einen Einfluss auf die Verarbeitung mit dem Anti-Wrinkle-Modul. Die im Randbereich eingebrachte Verzerrung sorgt für hohe mechanische Beanspruchungen. Durch eine angepasste Folienlegierung beziehungsweise Vorbehandlung für den Randbereich kann dabei eine optimale Kombination aus geringer Verformung für den beschichteten Bereich und hoher Duktilität für den unbeschichteten Randbereich gewählt werden.

Es ist erwiesen, dass das Kalandrieren von hochverdichteten Kathoden mit dem Anti-Wrinkle-Modul eine Prozessverbesserung darstellt. Dadurch ergibt sich sowohl eine höhere Qualität der Elektroden als auch weitere positive Einflüsse auf die nachfolgenden Prozessschritte. Aufgrund der Perspektive, dass damit höhere Batteriezellkapazitäten erreicht werden können, stellt das Forschungsergebnis einen großen Fortschritt in der Elektrodenproduktion dar.

10 Literaturverzeichnis

Quellenangaben, die mit dem Präfix (A_) gekennzeichnet sind, entsprechen studentischen Arbeiten. Die Abschlussarbeiten sind unter Anleitung des Verfassers der Dissertation erstellt worden.

(A_Bernecker 2021)

A_Bernecker, J. (2021), *Ermittlung des Materialverhaltens einer NMC-Kathode im Kalanderspalt zur Definition der Randbedingung für eine Wrinkle-freie Bearbeitung*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Denk 2019)

A_Denk, N. (2019), *Ermittlung der Wirkzusammenhänge beim Kalandrieren von Kathoden über eine statistische Versuchsplanung zur Fehlerminimierung*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Dieners 2020)

A_Dieners, D. (2020), *Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen Material- und Maschinenparametern für das Kalandrieren von Kathoden unter Berücksichtigung der Flächenbelastung*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Ströbel 2019)

A_Ströbel, R. (2019), *Automatisierung einer optischen In-Line Analyse beim Kalandrieren von Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien mittels Machine Vision Algorithmen*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Tran 2020)

A_Tran, A. (2020), *Entwicklung eines Algorithmus auf Basis von KI-Methoden zur Erkennung von Wrinkles beim Kalandrieren von hochverdichteten Kathoden*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Türke 2021)

A_Türke, F. (2021), *Untersuchung des Materialverzugs beim Kalandrieren von*

Batterieelektroden für Lithium-Ionen-Batterien mittels einer FEM-Simulation, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Zipperling 2019)

A_Zipperling, D. (2019), *Implementierung der Kommunikation von Systemen einer neuartige Qualitätssicherung am Kalandar zur Verarbeitung von Batterieelektroden*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Altenbach 2015)

Altenbach, H. (2015), *Kontinuumsmechanik*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-662-47069-5.

(Bae & Erdonmez et al. 2013)

Bae, C.-J.; Erdonmez, C. K.; Halloran, J. W. & Chiang, Y.-M. (2013), *Design of battery electrodes with dual-scale porosity to minimize tortuosity and maximize performance*, *Advanced materials*, 25 (9), S. 1254–1258, DOI: 10.1002/adma.201204055.

(Barthel & Bold et al. 2020)

Barthel, H.; Bold, B.; Denkmann, V.; Fleischer, J.; Holl, K.; Korsmeier, A.; Schebesta, S.; Tenhaeff, K. & Wöhrle, T. (2020), *Vorrichtung und Verfahren zum Verdichten von auf einem Kollektorband aufgebrachtem Elektrodenmaterial*, europäisches Patent EP4016664A1.

(Bauer 2017)

Bauer, S. (2017), *AkkuWelt*, Vogel Buchverlag, Würzburg, ISBN: 978-3-8343-3409-1.

(Bockholt & Haselrieder et al. 2013)

Bockholt, H.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2013), *Intensive Dry and Wet Mixing Influencing the Structural and Electrochemical Properties of Secondary Lithium-Ion Battery Cathodes*, *ECS Transactions*, 50 (26), S. 25–35, DOI 10.1149/05026.0025ecst.

(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.

(Bridgewater & Capener et al. 2021)

Bridgewater, G.; Capener, M. J.; Brandon, J.; Lain, M. J.; Copley, M. & Kendrick, E. (2021), *A Comparison of Lithium-Ion Cell Performance across Three Different Cell Formats, Batteries*, 7 (2), S. 1–14, DOI: 10.3390/batteries7020038.

(Daemi & Lu et al. 2019)

Daemi, S. R.; Lu, X.; Sykes, D.; Behnsen, J.; Tan, C.; Palacios-Padros, A.; Cookson, J.; Petrucco, E.; Withers, P. J.; Brett, D. J. L. & Shearing, P. R. (2019), *4D visualisation of in situ nano-compression of Li-ion cathode materials to mimic early stage calendaring, Materials Horizons*, 6 (3), S. 612–617, DOI: 10.1039/C8MH01533C.

(Doppelbauer 2020)

Doppelbauer, M. (2020), *Grundlagen der Elektromobilität*, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-29729-9.

(Du & Dunlap et al. 2014)

Du, Z.; Dunlap, R. A. & Obrovac, M. N. (2014), *High Energy Density Calendered Si Alloy/Graphite Anodes, Journal of The Electrochemical Society*, 161 (10), A1698-A1705, DOI 10.1149/2.0941410jes.

(Fritz & Schulze 2012)

Fritz, A. H. & Schulze, G. (2012), *Fertigungstechnik*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-642-29785-4.

(Gnanaraj & Cohen et al. 2001)

Gnanaraj, J.; Cohen, Y. S.; Levi, M. & Aurbach, D. (2001), *The effect of pressure on the electroanalytical response of graphite anodes and LiCoO₂ cathodes for Li-ion batteries, Journal of Electroanalytical Chemistry*, 516 (1-2), S. 89–102, DOI: 10.1016/S0022-0728(01)00663-5.

(Gulde 2015)

Gulde, J. (2015), *Walze*, deutsches Patent DE 10 2015 104 992 B3.

(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), S. 1–9, DOI: 10.1002/ente.201900026.

(Gutoff & Cohen 2006)

Gutoff, E. B. & Cohen, E. D. (2006), *Coating and drying defects, Troubleshooting operating problems*, Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, ISBN: 978-0-471-71368-5.

(Hackfort & Wolters et al. 2011)

Hackfort, T.; Wolters, K.; Wittebrock, H. & Gottszky, J. (2011), *Walzenanordnung mit einer Einrichtung zur Regelung des Walzenspaltes sowie Verfahren zur Regelung des Walzenspaltes in einer Walzenanordnung*, deutsches Patent DE 10 2011 018 874 83.

(Haselrieder 2016)

Haselrieder, W. (2016), *Kalandrierung zur gezielten Einstellung der Batterieelektroden-Performance*, Dissertation, Institut für Partikeltechnik, Technische Universität Braunschweig, Sierke Verlag, Göttingen, ISBN: 978-3-86844-942-6.

(He & Huang et al. 2021)

He, S.; Huang, S.; Wang, S.; Mizota, I.; Liu, X. & Hou, X. (2021), *Considering Critical Factors of Silicon/Graphite Anode Materials for Practical High-Energy Lithium-Ion Battery Applications*, *Energy & Fuels*, 35 (2), S. 944–964, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c02948.

(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), DOI: 10.1149/1945-7111/ac24bb.

(Jendrischik & Hüppohl 2010)

Jendrischik, M. & Hüppohl, J. (2010), *E-Mobilität, CleanTech-Branche, Treiber im*

Fokus, Hrsg. Deutsches Clean Tech Institut (DCTI), Bonn, ISBN: 978-3-942292-10-8.

(Jiang & Hosono et al. 2006)

Jiang, C.; Hosono, E. & Zhou, H. (2006), *Nanomaterials for lithium ion batteries, nanotoday*, 1 (4), S. 28–33, DOI: 10.1016/S1748-0132(06)70114-1.

(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.

(Kang & Lim et al. 2017)

Kang, H.; Lim, C.; Li, T.; Fu, Y.; Yan, B.; Houston, N.; Andrade, V. de; Carlo, F. de & Zhu, L. (2017), *Geometric and Electrochemical Characteristics of LiNi 1/3 Mn 1/3 Co 1/3 O 2 Electrode with Different Calendering Conditions*, *Electrochimica Acta*, 232, S. 431–438, DOI: 10.1016/j.electacta.2017.02.151.

(Ketterer & Karl et al. 2009)

Ketterer, B.; Karl, U.; Möst, D. & Ulrich, S. (2009), *Lithium-Ionen Batterien, Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen*, Forschungsbericht FZKA-7503 (Oktober 2009) Institut für Materialforschung - Angewandte Werkstoffphysik (IMF1), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), DOI: 10.5445/IR/270081162.

(Kim & Jeon et al. 1999)

Kim, K. M.; Jeon, W. S.; Chung, I. J. & Chang, S. H. (1999), *Effect of mixing sequences on the electrode characteristics of lithium-ion rechargeable batteries*, *Journal of Power Sources*, 83 (1-2), S. 108–113, DOI: 10.1016/S0378-7753(99)00281-5.

(Kim & Lee et al. 2018)

Kim, J.; Lee, H.; Cha, H.; Yoon, M.; Park, M. & Cho, J. (2018), *Prospect and Reality of Ni-Rich Cathode for Commercialization*, *Advanced Energy Materials*, 8 (6), S. 2–25, DOI: 10.1002/aenm.201702028.

(Kleppmann 2013)

Kleppmann, W. (2013), *Versuchsplanung, Produkte und Prozesse optimieren*, Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-43752-4.

(Korthauer 2013)

Korthauer, R. (2013), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-642-30652-5.

(Kreutzer & Sirrenberg 2019)

Kreutzer, R. T. & Sirrenberg, M. (2019), *Künstliche Intelligenz verstehen, Grundlagen - Use-Cases - unternehmenseigene KI-Journey*, Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-25560-2.

(Kroll 2013)

Kroll, A. (2013), *Computational Intelligence, Eine Einführung in Probleme, Methoden und technische Anwendungen*, Oldenbourg Verlag, München, ISBN: 978-3-486-70976-6.

(Lee & Jeon 2014)

Lee, S. G. & Jeon, D. H. (2014), *Effect of electrode compression on the wettability of lithium-ion batteries*, *Journal of Power Sources*, 265, S. 363–369, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.04.127.

(Marks & Trussler et al. 2011)

Marks, T.; Trussler, S.; Smith, A. J.; Xiong, D. & Dahn, J. R. (2011), *A Guide to Li-Ion Coin-Cell Electrode Making for Academic Researchers*, *Journal of The Electrochemical Society*, 158 (1), A51–A57, DOI 10.1149/1.3515072.

(Matsumura & Tada et al. 2014)

Matsumura, N.; Tada, K. & Yamaga, A. (2014), *Pressure Roll and Roll Press Machine Therewith*, japanisches Patent JP002016120503A.

(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), S.1–16, DOI: 10.3390/pr9112009.

(Meyer 2019)

Meyer, C. (2019), *Prozessmodellierung der Kalandrierung von Lithium-Ionen-*

Batterie-Elektroden, Dissertation, Institut für Partikeltechnik, Technische Universität Braunschweig, Sierke Verlag, Göttingen, ISBN: 978-3-96548-043-8.

(Meyer & Bockholt et al. 2017)

Meyer, C.; Bockholt, H.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2017), *Process Characterization of Calendering Electrodes for Lithium Ion Batteries*, *Journal of Materials Processing Technology*, 249, S. 172–178, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.031.

(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. 1–12, DOI: 10.1002/ente.201900175.

(Ostermann 2014)

Ostermann, F. (2014), *Anwendungstechnologie Aluminium*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-662-43806-0.

(Overhagen 2018)

Overhagen, C. (2018), *Modelle zum Walzen von Flach- und Vollquerschnitten*. Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Institut für Technologien der Metalle, Universität Duisburg-Essen, Essen, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:464-20181116-114523-7>, zuletzt geprüft am [04.07.2023].

(Primo & Chouchane et al. 2021)

Primo, E. N.; Chouchane, M.; Touzin, M.; Vazquez, P. & Franco, A. A. (2021), *Understanding the calendering processability of Li(Ni_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33})O₂-based cathodes*, *Journal of Power Sources*, 488, S. 1–11, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.229361.

(Rauscher 2014)

Rauscher, S. (2014), *Einfluss von Material- und Beschichtungsparametern auf die Elektrodenmorphologie und die Leistungsparameter von Lithiumionen-Zellen*, Dissertation, Universität Ulm, Ulm, DOI: 10.18725/OPARU-2647.

(Röthemeyer & Sommer 2013)

Röthemeyer, F. & Sommer, F. (2013), *Kautschuk Technologie, Werkstoffe - Verarbeitung - Produkte*, Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-43760-9.

(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. 1–10, DOI: 10.1002/ente.201900180.

(Schlick & Hertel et al. 2011)

Schlick, T.; Hertel, G.; Hagemann, B. & Maiser, E. (2011), *Zukunftsfeld Elektromobilität*, Hrsg. Roland Berger Strategy Consultants, S. 1–44, https://fva-net.de/fileadmin/download/VDMA_E-Mobility-Studie_20110511.pdf, zuletzt geprüft am [04.07.2023].

(Schmitt & Diehm et al. 2015)

Schmitt, M.; Diehm, R.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2015), *An experimental and analytical study on intermittent slot die coating of viscoelastic battery slurries*, *Journal of Coatings Technology and Research*, 12 (5), S. 927–938, DOI: 10.1007/s11998-015-9717-9.

(Schreiner & Oguntke et al. 2019)

Schreiner, D.; Oguntke, M.; Günther, T. & Reinhart, G. (2019), *Modelling of the Calendering Process of NMC-622 Cathodes in Battery Production Analyzing Machine/Material–Process–Structure Correlations*, *Energy Technology*, 7 (11), S. 1–11, DOI: 10.1002/ente.201900840.

(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, S. 1–8, DOI: 10.3389/fenrg.2014.00056.

(Shim & Striebel 2003)

Shim, J. & Striebel, K. A. (2003), *Effect of electrode density on cycle performance and irreversible capacity loss for natural graphite anode in lithium-ion batteries*, *Journal of Power Sources*, 119-121, S. 934–937, DOI: 10.1016/S0378-7753(03)00235-0.

(Siebertz & van Bebber et al. 2017)

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplanung, Design of Experiments (DoE)*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-662-55742-6.

(Stieß 2009)

Stieß, M. (2009), *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-540-32551-2.

(Sun & Choi et al. 2015)

Sun, H.-H.; Choi, W.; Lee, J. K.; Oh, I.-H. & Jung, H.-G. (2015), *Control of electrochemical properties of nickel-rich layered cathode materials for lithium ion batteries by variation of the manganese to cobalt ratio*, *Journal of Power Sources*, 275, S. 877–883, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.11.075.

(Süße & Rodner 2014)

Süße, H. & Rodner, E. (2014), *Bildverarbeitung und Objekterkennung*, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-8348-2605-3.

(Thielmann & Neef et al. 2017)

Thielmann, A.; Neef, C.; Hettesheimer, T.; Döscher, H.; Wietschel, M. & Tübke, J. (2017), *Energiespeicher-Roadmap (Update 2017), Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien*, Hrsg. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, S. 1–124, <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf>, zuletzt geprüft am [05.03.2023].

(Tran & Greco et al. 2012)

Tran, H. Y.; Greco, G.; Täubert, C.; Wohlfahrt-Mehrens, M.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2012), *Influence of electrode preparation on the electrochemical performance of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ composite electrodes for lithium-ion batteries*, *Journal of Power Sources*, 210, S. 276–285, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.03.017.

(Unselde 2020)

Unselde, R. (2020), „Die Feststoffelektrolyt-Technik ist ein möglicher Impulsgeber“, *ATZelektronik*, 15 (12), S. 22–25, DOI: 10.1007/s35658-020-0302-3.

(van Schalkwijk & Scrosati 2002)

van Schalkwijk, W. A. & Scrosati, B. (2002), *Advances in lithium-ion batteries*, Springer, New York, ISBN: 0-306-47356-9.

(Vetter & Novák et al. 2005)

Vetter, J.; Novák, P.; Wagner, M. R.; Veit, C.; Möller, K.-C.; Besenhard, J. O.;

Winter, M.; Wohlfahrt-Mehrens, M.; Vogler, C. & Hammouche, A. (2005), *Ageing mechanisms in lithium-ion batteries*, *Journal of Power Sources*, 147 (1-2), S. 269–281, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.

(Weisenberger & Guth et al. 2014)

Weisenberger, C.; Guth, G.; Bernthaler, T. & Knoblauch, V. (2014), *Neue gefü-geanalytische Methoden zur Beurteilung der Fertigungsqualität von Lithium-Ionen-Akkumulatoren: Tagungsband*, *Practical Metallography*, 51 (1), S. 5–31, DOI: 10.3139/147.110260.

(Zhang & Xu et al. 2017)

Zhang, C.; Xu, J.; Cao, L.; Wu, Z. & Santhanagopalan, S. (2017), *Constitutive behavior and progressive mechanical failure of electrodes in lithium-ion batteries*, *Journal of Power Sources*, 357, S. 126–137, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.04.103.

(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.

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1-1: Energiedichte in Abhängigkeit der Anwendung</i>	2
<i>Abbildung 1-2: Lage des Elektrodendefektes „Wrinkle“</i>	4
<i>Abbildung 2-1: Aufbau und Funktionsweise einer Batteriezelle</i>	8
<i>Abbildung 2-2: Aufbau einer Elektrode (in Anlehnung an (Ketterer & Karl et al. 2009))</i>	10
<i>Abbildung 2-3: Interkalation abhängig von der Materialstruktur</i>	12
<i>Abbildung 2-4: Mechanische Alterungseffekte einer Kathode</i>	14
<i>Abbildung 2-5: Prozesskette einer Batteriezellproduktion</i>	15
<i>Abbildung 2-6: Abhängigkeit der Viskosität von der Scherrate</i>	18
<i>Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des Kalandrierens und dessen Einfluss auf die Materialeigenschaften</i>	20
<i>Abbildung 2-8: Elektrodenlayouts in Abhängigkeit von dem Batteriezelltyp</i>	22
<i>Abbildung 2-9: Kapazität in Abhängigkeit von der Elektrodendichte</i>	25
<i>Abbildung 2-10: Einfluss des Kalandrierens auf die elektrische Leitfähigkeit</i>	26
<i>Abbildung 2-11: Einfluss des Kalandrierens auf die Batteriezellkapazität</i>	27
<i>Abbildung 2-12: Prozess- und Materialgrößen für das Kalandrieren im Überblick</i>	29
<i>Abbildung 2-13: Notwendige Linienlasten für Anode und Kathode</i>	30
<i>Abbildung 2-14: Einfluss des Kalandrierens von Li-NMC-Partikeln auf eine 15 µm dicke Aluminiumfolie</i>	32
<i>Abbildung 2-15: Zugversuche an Kathodenmaterialien für unterschiedliche Zustände (aus (A_Bernecker 2021))</i>	33
<i>Abbildung 2-16: Zugversuche an einer NMC 111-Kathode für unterschiedliche Porosität (aus (Zheng & Tan et al. 2012))</i>	34
<i>Abbildung 3-1: Geometrische Beschreibung des Walzenspalts</i>	36
<i>Abbildung 3-2: Kräfteverhältnisse im Walzenspalt</i>	37
<i>Abbildung 3-3: Großkalender am KIT</i>	39
<i>Abbildung 3-4: Kalenderwalzenbiegung mit und ohne Bombage</i>	41

<i>Abbildung 3-5: Walzfehler</i>	43
<i>Abbildung 3-6: Wellenbildung bei kalandrierten Elektroden</i>	44
<i>Abbildung 3-7: Freischnitt einer Elektrode mit Wrinkle-Bildung im Kalanderspalt</i>	45
<i>Abbildung 3-8: Freischnitt einer Intermittierungslücke mit Faltenbildung im Kalanderspalt</i>	46
<i>Abbildung 3-9: Faltenbildung an einer Umlenkwalze</i>	47
<i>Abbildung 3-10: Weitere Elektrodendefekte</i>	48
<i>Abbildung 3-11: Mischvariationen (aus (Kim & Jeon et al. 1999))</i>	50
<i>Abbildung 3-12: Einfluss der Feuchte verschiedener Verdichtungsgrade auf die Elektrodeneigenschaften (in Anlehnung an (Huttner & Diener et al. 2021))</i>	52
<i>Abbildung 3-13: Auswirkung des Verdichtungsgrades auf die Welligkeit eines einzelnen Elektrodensheets (Ergebnisse aus (Mayer & Wurba et al. 2021))</i>	54
<i>Abbildung 3-14: Benetzungsrate in Abhängigkeit zur kalandrierten Elektrodendicke (aus (Sheng & Fell et al. 2014))</i>	55
<i>Abbildung 5-1: Definiertes Koordinatensystem für Elektroden</i>	62
<i>Abbildung 5-2: Verhalten der oberen Beschichtung in der Haftkraftmessung und Auswirkung auf das Messergebnis</i>	66
<i>Abbildung 5-3: Veränderung der Versagensebene für die Haftkraftmessung</i>	67
<i>Abbildung 5-4: Positionen der Abschälproben</i>	68
<i>Abbildung 5-5: Temperaturaufzeichnung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten</i>	70
<i>Abbildung 5-6: Messdaten der Elektrodenbahngeschwindigkeit</i>	71
<i>Abbildung 5-7: Verortung der Messsysteme zur Parameteraufzeichnung</i>	75
<i>Abbildung 5-8: Vergleich der Welligkeit einer unkalandrierten und kalandrierten Elektrode am Kalandrerwalzenauslauf in [mm]</i>	76
<i>Abbildung 5-9: Systeme zur Verzerrungsdetektion</i>	77
<i>Abbildung 5-10: Überblick über das Druck- und Kamerasystem</i>	78
<i>Abbildung 5-11: Druckmuster</i>	79
<i>Abbildung 5-12: Stereokamerasystem</i>	80

<i>Abbildung 5-13: Verarbeitung der Aufnahmen zur Verzerrungsbestimmung</i>	83
<i>Abbildung 5-14: REM-Aufnahme eines gedruckten Punktes im Querschnitt einer kalandrierten Elektrode</i>	86
<i>Abbildung 5-15: Fiktive berechnete Punkte als Hilfsmaßnahme für fehlende Druckpunkte</i>	87
<i>Abbildung 5-16: Konzept zur Überprüfung der Messgenauigkeit der Verzerrungsmessung</i>	88
<i>Abbildung 5-17: Muster für die Verzerrungsdetektion mit GOM</i>	89
<i>Abbildung 5-18: Verzerrungsmessung durch Bewegung des Systems</i>	90
<i>Abbildung 5-19: Geometrische Beschreibung eines Wrinkles</i>	91
<i>Abbildung 5-20: Systeme zur Wrinkle-Detektion</i>	92
<i>Abbildung 5-21: Datengewinnung mit Hilfe des Lasersensors</i>	94
<i>Abbildung 5-22: Grenzwertbildung zur Beschichtungserkennung</i>	95
<i>Abbildung 5-23: Übersicht der Datenaufnahme mit Hilfe der Kamera und deren Verarbeitung</i>	97
<i>Abbildung 5-24: Kamera und Aufnahme zur Wrinkle-Detektion mit KI-Methoden</i>	98
<i>Abbildung 5-25: Darstellung der Versuchspläne CCD und BBD</i>	102
<i>Abbildung 5-26: Darstellung des Versuchsplans CCI</i>	104
<i>Abbildung 6-1: Darstellung des Versuchsplans zur Dichteänderung</i>	105
<i>Abbildung 6-2: Zusammenhang zwischen Dichte, Linienlast, Kalandrierwalzentemperatur und Haftkraft</i>	107
<i>Abbildung 6-3: Einfluss der Wrinkles auf die Haftkraft</i>	107
<i>Abbildung 6-4: Wrinkle-Ausprägung und Dehnung der Beschichtungsoberfläche in Abhängigkeit zur Elektrodendichte</i>	110
<i>Abbildung 6-5: Einfluss des Bahnzuges auf die Wrinkle-Ausprägung</i>	111
<i>Abbildung 6-6: Datenaufnahme der Wellen einer Elektrode</i>	112
<i>Abbildung 6-7: Auswertung der Wellenbildung der Elektroden</i>	114
<i>Abbildung 6-8: Auswirkung des Bahnzuges auf die Wellenbildung</i>	115

<i>Abbildung 6-9: MLP-Netz zur Wrinkle-Modellbildung</i>	117
<i>Abbildung 6-10: Modellergebnisse</i>	120
<i>Abbildung 7-1: Dehnungsunterschied zwischen dem beschichteten und dem unbeschichteten Bereich</i>	121
<i>Abbildung 7-2: Simulation des Walzprozesses (in Anlehnung (A_Türke 2021))</i>	122
<i>Abbildung 7-3: Konzept für Druckumformen</i>	125
<i>Abbildung 7-4: Konzept für Zugdruckumformen mittels einer Prägung</i>	126
<i>Abbildung 7-5: Konzept für Zugumformen</i>	127
<i>Abbildung 7-6: Funktionsweise der Prozesserweiterung</i>	129
<i>Abbildung 7-7: Parameterfindung für die Prozesserweiterung</i>	130
<i>Abbildung 7-8: Auswertung eines Zugversuchs (aus (A_Bernecker 2021))</i>	131
<i>Abbildung 7-9: Schematische Darstellung des Anti-Wrinkle-Moduls</i>	132
<i>Abbildung 7-10: Umsetzung des Anti-Wrinkle-Moduls</i>	132
<i>Abbildung 7-11: Detaillierte Darstellung des Anti-Wrinkle-Moduls</i>	134
<i>Abbildung 7-12: Anfahrbetrieb der Kalandrierlinie inklusive Anti-Wrinkle-Modul</i>	137
<i>Abbildung 8-1: Vergleichende Wrinkle-Messung</i>	140
<i>Abbildung 8-2: Dehnungsmessung im Vergleich</i>	141
<i>Abbildung 8-3: Wellenbildung im Vergleich</i>	142
<i>Abbildung 8-4: Materialspannungsverteilung und resultierende Faltenbildung der Elektrode am Anti-Wrinkle-Modul (z.T. aus (A_Türke 2021))</i>	143
<i>Abbildung 8-5: Ergebnisse aus Zugversuchen</i>	144
<i>Abbildung 8-6: Prozess- und Materialgrößen für das Anti-Wrinkle-Modul</i>	145

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2-1: Übersicht ausgewählter Kathodenmaterialien</i>	12
<i>Tabelle 3-1: Ergebnisse der Mischmethoden (aus (Kim & Jeon et al. 1999))</i>	50
<i>Tabelle 5-1: Übersicht des Versuchsprotokolls</i>	61
<i>Tabelle 5-2: Dickenmessung</i>	63
<i>Tabelle 5-3: Bestimmung von Flächengewicht und Dichte</i>	64
<i>Tabelle 5-4: Haftkraftmessung</i>	65
<i>Tabelle 5-5: Protokollierung der Anlagenparameter</i>	69
<i>Tabelle 5-6: Aufzeichnung der Linienlast</i>	72
<i>Tabelle 5-7: Vermessung der Wrinkle-Geometrie</i>	73
<i>Tabelle 5-8: Aufnahme der Materialverzerrung</i>	74
<i>Tabelle 5-9: Ablaufplan der Versuchsdurchführung</i>	75
<i>Tabelle 5-10: Genauigkeitsmessung der Verzerrungsmessung</i>	87
<i>Tabelle 5-11: Übersicht über Versuchspläne (in Anlehnung an (A_Denk 2019))</i>	102
<i>Tabelle 5-12: Übersicht über den Versuchsplan 1 (A_Denk 2019)</i>	103
<i>Tabelle 5-13: Übersicht über den Versuchsplan 2 (A_Dieners 2020)</i>	104
<i>Tabelle 6-1: Übersicht des Versuchsplans 3 für unterschiedliche Zieldichten</i>	105
<i>Tabelle 7-1: Entscheidungsmatrix</i>	128
<i>Tabelle 8-1: Änderungen durch den Einsatz des Anti-Wrinkle-Moduls</i>	139
<i>Tabelle 8-2: Wrinkle-Messwerte</i>	141

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 selbsttätige 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 fünffachsigen 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 Produktionssysteme 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 Hauptspindeltriebsdynamik 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 Mauerwerkbaus 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 Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess 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 Qualitätsmethodenintegration

Band 91
Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92
Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung 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

Entwicklungintegrierte 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 Hühsam

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 Gönzheimer

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 Mikroteile

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 thermische 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

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien 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 Führungswerkzeuge

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 μ MIM-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 adaptiven 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-Antriebsselementen

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 ressourceneffizienter
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 automobiler 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-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit
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

Schädigungsfreie 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 Mikrotextrurierung

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

Wälzschälern 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 Vereinzelnungs- 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 Kugelgewindetriebspindeln

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

