

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

Dominik Mayer

**Analyse prozessübergreifender
Wirkzusammenhänge zur Modellierung der
Stapelbildung in der Batteriezellfertigung**
Ein Beitrag zur Bewertung geometrischer Effekte
in Elektroden auf die Stapelgenauigkeit

Band 308

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

Dominik Mayer

**Analyse prozessübergreifender
Wirkzusammenhänge zur Modellierung der
Stapelbildung in der Batteriezellfertigung**
Ein Beitrag zur Bewertung geometrischer Effekte in
Elektroden auf die Stapelgenauigkeit

Band 308

**Analyse prozessübergreifender Wirkzusammenhänge zur
Modellierung der Stapelbildung in der Batteriezellfertigung**
Ein Beitrag zur Bewertung geometrischer Effekte in Elektroden auf
die Stapelgenauigkeit

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

Dominik Mayer, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2025
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Franz Dietrich

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

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

Copyright Shaker Verlag 2026

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

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8191-0717-7
PDF-ISBN 978-3-8191-0659-0
ISSN 2944-6430
eISSN 2944-6449
<https://doi.org/10.2370/9783819106590>

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, nachhaltiger und wirtschaftlicher Technologien stellt den entscheidenden Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen dar. 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 mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung von Produktionssystemen und -netzwerken. 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

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferats. Sein Vertrauen und seine stetige Unterstützung während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und später als Gruppenleiter und Oberingenieur haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit und zu meiner persönlichen Weiterentwicklung beigetragen. Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Dietrich für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans für den Prüfungsvorsitz.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am wbk und insbesondere dem Forschungsbereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung möchte ich für die angenehme und vertrauensvolle Zusammenarbeit herzlich danken. Die freundschaftliche Atmosphäre und die Unterstützung habe ich sehr geschätzt und erinnere mich gerne an die gemeinsamen Stunden und Erlebnisse. Darüber hinaus möchte ich auch die zahlreichen Studierenden hervorheben, die als wissenschaftliche Hilfskräfte oder im Rahmen von Abschlussarbeiten zum Erfolg meiner Dissertation beigetragen haben.

Abschließend gilt mein größter Dank meinen Eltern, meinen Geschwistern sowie meiner Partnerin, ohne deren fortwährende Unterstützung und ermutigenden Worte diese Dissertation nicht möglich gewesen wäre.

Karlsruhe, im April 2026

Dominik Mayer

Abstract

High-performance battery cells are an essential component of technological progress and, in terms of electric mobility, one of the key technologies for electrified vehicles. The rapidly increasing global demand for battery cells turns their production into the spotlight of current research. Despite intensive research efforts, the complex process chain with its multi-process cause-effect relationships is not fully understood. This leads to lengthy development and commissioning phases for the plants and processes. Stacking has also proven to be an important process step in battery cell production. Its essential quality parameter stacking accuracy highly depends on previous process steps. However, quantifying cause-effect relationships have not yet been sufficiently investigated.

The aim of the dissertation is therefore to elaborate the missing understanding of the cause-effect relationships between previous process steps and the stacking accuracy. Based on this, a model with the relevant parameters is developed to support and optimise the lengthy development and commissioning phases. The focus of the investigations is on the process steps of calendaring, separating and single-sheet stacking.

To achieve this, corrugations in the cathode that occur during calendaring and the resulting geometric effects on the separated cathode sheets are quantified in experimental investigations. Subsequently, the effects of the cathode sheet shapes on the stacking accuracy after single-sheet stacking are also investigated experimentally. Based on the results, relevant parameters affecting the stacking accuracy are identified and integrated into a finite element model. A methodology for modelling the material behaviour is developed and validated together with the finite element model. Finally, a possible application of the model is shown using a selected application as an example.

Kurzfassung

Leistungsfähige Batteriezellen sind ein wesentlicher Bestandteil des technologischen Fortschritts und im Hinblick auf die Elektromobilität eine der Schlüsseltechnologien für elektrifizierte Fahrzeuge. Die global stark steigende Nachfrage nach Batteriezellen rückt die Herstellung der Batteriezellen in den Fokus der aktuellen Forschung. Trotz intensiver Forschungsbemühungen ist die komplexe Prozesskette mit den prozessübergreifenden Wirkzusammenhängen jedoch nicht vollständig verstanden, was zu langwierigen Entwicklungs- und Inbetriebnahmephasen der Anlagen und Prozesse führt. Als wichtiger Prozessschritt in der Batteriezellfertigung zeigt sich auch die Stapelbildung mit dem essentiellen Qualitätsparameter der resultierenden Stapelgenauigkeit abhängig von vorhergehenden Prozessschritten, wobei quantifizierende Wirkzusammenhänge noch unzureichend untersucht sind.

Ziel der Dissertation ist daher das fehlende Verständnis der Wirkzusammenhänge vorhergehender Prozessschritte auf die Stapelgenauigkeit zu erarbeiten, sowie darauf basierend ein Modell mit den relevanten Parametern bereitzustellen, das die langwierige Anlagen- und Prozessentwicklung unterstützt und optimiert. Der Fokus der Untersuchungen wird dabei auf die Prozessschritte der Kalandrierung, Vereinzelung und Einzelblattstapelbildung gelegt.

Hierzu werden in experimentellen Untersuchungen die bei der Kalandrierung auftretenden Welligkeiten in der Kathodenbahn sowie die daraus resultierenden geometrischen Einflüsse auf die vereinzelt Kathodenblätter quantifiziert. Anschließend werden die Auswirkungen der Kathodenblattgeometrien auf die Einzelblattstapelbildung experimentell untersucht, wobei der Fokus auf der resultierenden Stapelgenauigkeit liegt. Auf Basis der Erkenntnisse werden die relevanten Einflussparameter auf die Stapelgenauigkeit herausgearbeitet und in ein Finite-Elemente-Modell überführt. Für dieses wird eine Methodik zur Modellierung des Materialverhaltens entwickelt und gemeinsam mit dem Modell validiert. Eine mögliche Anwendung des Modells wird abschließend exemplarisch an einem ausgewählten Anwendungsfall gezeigt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelzeichen	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Lithium-Ionen-Batteriezellen	7
2.1.1 Funktionsweise und grundlegende Komponenten	7
2.1.2 Bauformen und Formate	10
2.2 Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen	12
2.2.1 Allgemeine Prozesskette	12
2.2.2 Kalandrierung	16
2.2.3 Längsschneiden und Konfektionieren	23
2.2.4 Zellstapelbildung mit Einzelblattelektroden	26
2.3 Modellierungsansätze in der Batteriezellfertigung	34
2.3.1 Ansätze zur mechanischen Produktmodellierung	34
2.3.2 Ansätze zur Prozessmodellierung	41
2.4 Ableitung des Defizits im Stand der Forschung und Technik	43
2.4.1 Bewertung des Stands der Forschung und Technik	43
2.4.2 Ableitung des Defizits	46
3 Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise	48
3.1 Präzisierte Zielsetzung	48
3.2 Vorgehensweise	50
4 Analyse der Einzelblattstapelbildung	53
4.1 Ableitung eines Referenzprozesses	53
4.1.1 Funktionen- und Systemanalyse des Einzelblattstapels	53

4.1.2	Definition des Referenzprozesses	56
4.2	Identifikation und Analyse der Einflussgrößen auf die Stapelgenauigkeit	59
5	Geometrische Charakterisierung der Einzelblattelektroden	66
5.1	Geometrische Effekte in Einzelblattelektroden	67
5.1.1	Längen- und Breitenabweichungen	67
5.1.2	Unebenheiten im Elektrodenblatt	69
5.2	Experimentelles Vorgehen	72
5.2.1	Zielgrößen	72
5.2.2	Versuchsablauf, Anlagentechnik und Messsystem	75
5.2.3	Untersuchte Einflussfaktoren und Faktorstufen	79
5.2.4	Ableitung des Versuchsplans	82
5.3	Analyse der Elektrodenwelligkeit nach der Kalandrierung	83
5.3.1	Mittenwellen in Maschinenrichtung	84
5.3.2	Randwellen am Beschichtungsübergang	94
5.4	Analyse der geometrischen Form der vereinzelt Kathoden	97
5.4.1	Charakteristische Formen der Einzelblätter	97
5.4.2	Quantifizierung der Ebenheitsabweichung	103
5.4.3	Zeitlicher Einfluss der Coillagerung auf das Einzelblatt	108
6	Experimentelle Untersuchung der Einzelblattstapelbildung	113
6.1	Entwicklung eines Versuchsstands	114
6.1.1	Anforderungsanalyse	115
6.1.2	Systemstruktur und Teillösungen	118
6.1.3	Gesamtkonzept und Realisierung	123
6.2	Versuchsplanung	127
6.2.1	Zielgrößen der einzelnen Prozessschritte	127
6.2.2	Untersuchte Einflussfaktoren und Faktorstufen	129
6.2.3	Aufstellen der Versuchspläne	132
6.3	Einfluss des Ausricht- und Greifprozesses	134
6.3.1	Experimentelle Versuchsdurchführung und Auswertung	134

6.3.2	Bewertung des Ausricht- und Greifprozesses	136
6.4	Einfluss des Handhabungsprozesses	142
6.4.1	Experimentelle Versuchsdurchführung und Auswertung	143
6.4.2	Bewertung des Handhabungsprozesses	144
6.5	Einfluss des Ablageprozesses	145
6.5.1	Experimentelle Versuchsdurchführung und Auswertung	145
6.5.2	Bewertung des Ablageprozesses	147
6.6	Einfluss der Niederhalter-Greifer-Interaktion mit dem Stapel	155
6.6.1	Experimentelle Versuchsdurchführung	156
6.6.2	Bewertung der Niederhalter-Greifer-Interaktion	158
7	Modellierung der Stapelgenauigkeit für das Einzelblattstapeln	164
7.1	Modellierungsansatz der Stapelbildung für großformatige Elektroden	165
7.1.1	Aufbau eines FE-Simulationsmodells für die Stapelgenauigkeit	165
7.1.2	Modellierung des Kathodenmaterialverhaltens	167
7.2	Validierung des Simulationsmodells	181
7.2.1	Parametrierung des Modells	181
7.2.2	Abgleich der Simulation mit den Versuchsergebnissen	184
7.3	Exemplarische Anwendung und Bewertung des Modells	187
7.3.1	Auswirkung des Cambereffekts auf die Stapelgenauigkeit	187
7.3.2	Bewertung und kritische Diskussion des Modells	190
8	Zusammenfassung und Ausblick	192
8.1	Zusammenfassung	192
8.2	Ausblick	195
	Publikationsliste des Autors	197
	Literaturverzeichnis	201
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	IX
	Anhang	XI

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
3D	Dreidimensionalität
Al	Aluminium
B	Bereichsforderung
BATEC	Batterietechnikum des Karlsruher Instituts für Technologie
BSS	Bandstahlschnitt
CFD	Computational Fluid Dynamics
Co	Cobalt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DEI	Defect Evaluation Index
DSD	Definitive Screening Design
E-Modul	Elastizitätsmodul
ESV	Elektroden-Separator-Verbund
EV	Electric Vehicle
F	Festforderung
FAST	Function Analysis System Technique
FE	Finite Elemente
FS	Feinstanze
GWh	Gigawattstunde
LCO	Lithium-Cobalt-Oxid
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LIB	Lithium-Ionen-Batteriezele
LiMO ₂	Lithium-Metall-Oxid
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
Mn	Mangan
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid
Ni	Nickel
NMC111	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid mit dem Verhältnis von Nickel, Mangan und Cobalt von 1:1:1
NMC622	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid mit dem Verhältnis von Nickel, Mangan und Cobalt von 6:2:2
NMC811	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid mit dem Verhältnis von Nickel, Mangan und Cobalt von 8:1:1
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylenterephthalat
PKW	Personenkraftwagen
PVDF	Polyvinylidenfluorid
TWh	Terawattstunde
W	Wunschforderung

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
A_{Al}	Querschnittsfläche des Substrats in einer Zugprobe	mm ²
A_B	Querschnittsfläche der Beschichtung in einer Elektrodenzugprobe	mm ²
A_K	Querschnittsfläche einer Elektrodenzugprobe	mm ²
$a_{K,DEI}$	Regressionskoeffizient	-
b_K	Breite eines Kathodenblatts	mm
$b_{K,Über}$	Breite eines Kathodenblatts mit Übermaß	mm
$b_{K,Unter}$	Breite eines Kathodenblatts mit Untermaß	mm
$C_{1,Al}$	Parameter für das Substrat zur Fließkurvenextrapolation nach Voce	MPa
$C_{2,Al}$	Parameter für das Substrat zur Fließkurvenextrapolation nach Voce	MPa
$C_{3,Al}$	Parameter für das Substrat zur Fließkurvenextrapolation nach Voce	-
$C_{1,B}$	Parameter für die Beschichtung zur Fließkurvenextrapolation nach Voce	MPa
$C_{2,B}$	Parameter für die Beschichtung zur Fließkurvenextrapolation nach Voce	MPa
$C_{3,B}$	Parameter für die Beschichtung zur Fließkurvenextrapolation nach Voce	-
d_{50}	Median-Partikelgröße in einer Partikelgrößenverteilung	µm
d_{Al}	Dicke des Substrats	µm
DEI_M	Defect Evaluation Index der Mittenwellen	mm
DEI_R	Defect Evaluation Index der Randwellen	mm
DEI_y	Defect Evaluation Index an der Stelle y	mm
d_H	Euklidische Distanz zwischen den Referenzpunkten vor und nach dem Handhabungsprozess	mm
d_{NGI}	Euklidische Distanz zwischen den Referenzpunkten vor und nach der Niederhalter-Greifer-Interaktion	mm
$e_{DEI,i}$	Residuum	mm
E	E-Modul	N mm ⁻²
E_{Al}	E-Modul des Substrats	N mm ⁻²
E_B	E-Modul der Beschichtung	N mm ⁻²
E_K	E-Modul der Elektrode	N mm ⁻²
E_{max}	E-Modul des vollständig verdichteten Beschichtungsmaterials	

E_t	Tangentialer E-Modul	N mm ⁻²
$F_{B,K}^{Exp}$	Gemessene Kraftwerte der Elektrode beim 2-Punkt-Biegeversuch	N
$F_{B,K}^{Sim}$	Simulierte Kraftwerte der Elektrode beim 2-Punkt-Biegeversuch	N
$\hat{f}_{K,DEI}$	Regressionsgerade für den Zusammenhang DEI_M und Π_B	mm
F_K	Bahzugkraft an der Elektrode	N
F_L	Linienlast bei der Kalandrierung	N mm ⁻¹
$F_{Z,Al}$	Zugkraft am Substrat einer Elektrodenzugprobe	N
$F_{Z,B}$	Zugkraft an der Beschichtung einer Elektrodenzugprobe	N
$F_{Z,K}$	Zugkraft an einer Elektrodenzugprobe	N
GP	Gauß'scher Prozess	-
k	Kovarianz	-
l_0	Einspannlänge einer Zugprobe	mm
l_K	Länge eines Kathodenblatts	mm
$l_{Kathode}$	Ausgewerteter Kathodenabschnitt zur Ermittlung der Wellen nach der Kalandrierung	mm
$l_{K,Über}$	Länge eines Kathodenblatts mit Übermaß	mm
$l_{K,Unter}$	Länge eines Kathodenblatts mit Untermaß	mm
L_{Mesh}	Elementkantenlänge	mm
m	Erwartungswert	-
m_B	Massenbeladung	mg cm ⁻²
$n_{W,M}$	Anzahl der Mittenwellen	-
$n_{W,R}$	Anzahl der Randwellen	-
$P_{Ab,1..4}$	Eckpunkte 1 bis 4 eines Kathodenblatts nach dem Ablageprozess	-
$P_{AG,1..4}$	Eckpunkte 1 bis 4 eines Kathodenblatts nach dem Ausricht- und Greifprozess	-
$P_{H,1..2}$	Zwei Referenzpunkte auf einem Kathodenblatt während des Handhabungsprozesses	-
$P_{M,1..4}$	Berechnete Mittelpunkte der vier gemessenen Eckpunkte nach dem Ablage- und Greifprozess	-
$P_{NGI,1..2}$	Zwei Referenzpunkte auf einem Kathodenblatt während der Niederhalter-Greifer-Interaktion	-
R^2	Bestimmtheitsmaß	-
$R_{p0,2}$	Dehngrenze	N mm ⁻²
s_c	Ausbauchung im Kathodeneinzelblatt	mm
t_{Sim}	Simulationsrechenzeit	min

$u_{P1..4}$	Verschiebung der vier Kathodenblatteckpunkte während der Simulation	mm
$u_{P1..4,x..y}$	Verschiebung der vier Kathodenblatteckpunkte in x- oder y-Richtung während der Simulation	mm
v_E	Verarbeitungsgeschwindigkeit bei der Kalandrierung	m min ⁻¹
$v_{Traverse}$	Traversengeschwindigkeit der Zugprüfmaschine	mm s ⁻¹
$X_{Ab,1..4}$	x-Koordinaten der vier Eckpunkte eines Kathodenblatts nach dem Ablageprozess	mm
$X_{AG,1..4}$	x-Koordinaten der vier Eckpunkte eines Kathodenblatts nach dem Ausricht- und Greifprozess	mm
x_E	x-Achse eines vereinzelt Kathodenblatts	mm
$x_{E,y,max}$	Position der maximalen Erhebung des Einzelblatts in einer Schnittkurve	mm
$X_{H,1..2}$	x-Koordinaten der zwei Referenzpunkte auf einem Kathodenblatt während des Handhabungsprozesses	mm
x_K	x-Achse einer Kathodenbahn nach der Kalandrierung	mm
X_M	x-Koordinate des berechneten Mittelpunkts P_M	mm
X_{NGI}	x-Koordinaten der zwei Referenzpunkte auf einem Kathodenblatt während der Niederhalter-Greifer-Interaktion	mm
$Y_{Ab,1..4}$	y-Koordinaten der vier Eckpunkte eines Kathodenblatts nach dem Ablageprozess	mm
$Y_{AG,1..4}$	y-Koordinaten der vier Eckpunkte eines Kathodenblatts nach dem Ausricht- und Greifprozess	mm
y_E	y-Achse eines vereinzelt Kathodenblatts	mm
$Y_{H,1..2}$	y-Koordinaten der zwei Referenzpunkte auf einem Kathodenblatt während des Handhabungsprozesses	mm
y_K	y-Achse einer Kathodenbahn nach der Kalandrierung	mm
Y_M	y-Koordinate des berechneten Mittelpunkts P_M	mm
Y_{NGI}	y-Koordinaten der zwei Referenzpunkte auf einem Kathodenblatt während der Niederhalter-Greifer-Interaktion	mm

z_E	z-Achse eines vereinzelt Kathodenblatts	mm
$z_{E,y}$	Schnittkurve eines Elektrodenblatts	mm
z_K	z-Achse einer Kathodenbahn nach der Kalandrierung	mm
$z_{K,y}$	Schnittkurve einer Kathodenbahn	mm
α	Anteil der Beschichtung am Zugwiderstand einer Zugprobe	-
α_A	Aquisitionsfunktion	-
β	Fittingparameter für das Kompressionsverhalten von Elektroden	-
δ_B	Beschichtungsdicke einer Elektrode nach der Kalandrierung	μm
$\delta_{B,0}$	Beschichtungsdicke einer Elektrode vor der Kalandrierung	μm
δ_E	Elektroden Dicke nach der Kalandrierung	μm
$\delta_{E,0}$	Elektroden Dicke vor der Kalandrierung	μm
δ_S	Substratdicke einer Elektrode	μm
Δl	Traversenweg der Zugprüfmaschine	mm
$\Delta u_{p,Nenn,x..y}$	Abweichung der Stapelsimulation von der Referenz in x- oder y-Richtung	mm
ε	Dehnung bzw. Stauchung	-
ε_p	Stauchung bei vollständig verdichtetem Beschichtungsmaterial	-
ε_T	Technische Dehnung	-
ε_W	Wahre Dehnung	-
λ	Länge der Wellen in der Kathodenbahn nach der Kalandrierung	mm
μ	Reibkoeffizient	-
Π_B	Verdichtungsgrad der Beschichtung	-
ρ_B	Beschichtungsdichte einer Elektrode nach der Kalandrierung	g cm^{-3}
$\rho_{B,0}$	Beschichtungsdichte einer Elektrode vor der Kalandrierung	g cm^{-3}
ρ_{theo}	Dichte der festen Beschichtungsbestandteile einer Elektrode	g cm^{-3}
ν_{Al}	Querkontraktionszahl des Substrats	-
ν_B	Querkontraktionszahl der Beschichtung	-
σ_C	Druckspannung	N mm^{-2}
σ_f^{Voce}	Fließkurve nach der Voce-Extrapolation	N mm^{-2}
$\sigma_{f,Al}$	Fließkurve des Substrats	N mm^{-2}
$\sigma_{f,B}$	Fließkurve der Beschichtung	N mm^{-2}
σ_T	Technische Spannung	N mm^{-2}
σ_W	Wahre Spannung	N mm^{-2}
σ^y	Fließspannung	N mm^{-2}

σ_Z	Zugspannung	N mm ⁻²
τ_i	Skalare Größe zur Bewertung der Abweichung der Simulation zum Experiment beim 2-Punkt-Biegeversuch	N
$\varphi_{B,K}$	Biegewinkel beim 2-Punkt-Biegeversuch	°
Φ_B	Porosität der Beschichtung	-
$\omega_{B,K}$	Rotationsgeschwindigkeit beim 2-Punkt-Biegeversuch	Grad s ⁻¹
ω_W	Walzengeschwindigkeit bei der Kalandrierung	rad min ⁻¹

1 Einleitung

1.1 Motivation

Leistungsfähige Batterien gelten als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts und sind Fundament und Enabler für viele weitere Hightech-Anwendungen. So werden Batterien beispielsweise in Kraftfahrzeugen, in Energiespeichersystemen oder in industriellen Applikationen eingesetzt. Insbesondere Lithium-Ionen-Batterien tragen einen wesentlichen Anteil an den technologischen Entwicklungen im Bereich der Unterhaltungselektronik, wie beispielsweise bei Smartphones, Tablets oder Smartwatches. (Amici & Asinari et al. 2022; Korthauer 2018, S. V)

Auch im Hinblick auf die Entwicklung nachhaltiger Verkehrs- und Energiesektoren, die im Jahr 2022 mit einem CO₂-Äquivalent von etwa 22 Gigatonnen gemeinsam für 41 % der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich waren, nehmen Batterien eine wichtige Rolle ein (Crippa & Guizzardi et al. 2023, S. 9). So erwarten (Heimes & Kampker et al. 2024, S. 45) beispielsweise, dass sich rein batteriebetriebene PKW langfristig durchsetzen werden. Ebenso sind Batterien ein wesentlicher Bestandteil bei der Integration regenerativer Energiequellen, wie Wind oder Solarenergie, in das bestehende Stromnetz mit dem Ziel Angebotsschwankungen ausgleichen zu können (EASE 2022, S. 12)¹. Die weltweit in 2023 getätigten Gesamtinvestitionen in Höhe von 115 Mrd. US-Dollar in Batterien für elektrisch angetriebene Fahrzeuge sowie 40 Mrd. US-Dollar in stationäre Batteriespeicher unterstreichen die immense globale Bedeutung des Wachstumsmarkts der Batterietechnologie (International Energy Agency 2024, S. 53)².

Während in 2023 elektrische Fahrzeuge mit einem Gesamtbatterievolumen von über 2.000 Gigawattstunden (GWh) in Betrieb waren, schätzen (Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 12), dass die globale Batteriezellnachfrage für elektrische PKW allein in 2025 bereits eine Terawattstunde (TWh) überschreiten könnte (International Energy Agency 2024, S. 23)³. Bei stationären Energiespeichern wird je nach Studie bis zum Jahr 2030 eine globale Nachfrage von 100 GWh bis 300 GWh erwartet (Michaelis &

¹ EASE (2022), *Energy Storage Targets 2030 and 2050. Ensuring Europe's Energy Security in a Renewable Energy System*. <https://ease-storage.eu/publication/energy-storage-targets-2030-and-2050/> [26.04.2025].

² International Energy Agency (2024), *Batteries and Secure Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report*. <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions> [26.04.2025].

³ Siehe Fußnote 2.

Schütrumpf et al. 2023, S. 12). Die steigende Nachfrage führt zwangsläufig zu der Notwendigkeit, neue Batteriezellfertigungskapazitäten bereitzustellen. Schätzungen für die global geplanten Fertigungskapazitäten für Lithium-Ionen-Batteriezellen (LIB) ergeben für das Jahr 2025 einen Bedarf zwischen 2.630 GWh und 4.313 GWh und im Jahr 2030 zwischen 3.377 GWh und etwa 8.000 GWh, wobei die Angaben von sich verändernden geopolitischen Rahmenbedingungen abhängig sind (International Energy Agency 2024, S. 113; Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 18)⁴.

Vom Bau des Fabrikgebäudes bis zur Ausbringung der Zielstückzahl vergehen dabei bei der Duplikation einer bestehenden Fabrik etwa 1,5 Jahre, während bei einer neu entwickelten Fabrik bis zu 4 Jahre benötigt werden (Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 15).

Die notwendige Dauer zur finalen Inbetriebnahme einer Batteriezellfabrik unterstreicht die Komplexität der Prozesse. Ein Grund hierfür sind die komplexen und verketteten Einzelprozesse, aus denen eine Batteriezellfertigung aufgebaut ist (Kwade & Haselrieder et al. 2018). Trotz intensiver Forschung sind bisher nicht alle Prozessschritte im Detail verstanden, was zu hohen Ausschussraten führt. Insbesondere die quantitativen Auswirkungen der einzelnen Prozessschritte auf die Folgeprozesse sowie die Auswirkungen von Prozessschwankungen auf die finale Batteriezellfunktionalität sind zwar ein Untersuchungsgegenstand gegenwärtiger Forschung, allerdings hinsichtlich der Gesamtprozesskette bisher nur unvollständig untersucht (Günther & Schreiner et al. 2019; Lombardo & Caro et al. 2022; Ventura Silva & Thomitzek et al. 2023).

Das fehlende Verständnis führt dazu, dass bei der Prozess- und Anlagenauslegung Toleranzanforderungen definiert werden, die aus funktionaler Sicht nicht notwendig wären, gleichzeitig jedoch die Anforderungen an die Prozesskette und die zugehörige Anlagentechnik stark erhöhen (Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 58; Thomitzek & Schmidt et al. 2021). Die Folge ist eine aufwändigere Inbetriebnahme, was sich negativ sowohl auf die Inbetriebnahmedauer als auch auf den hierbei notwendigen kostenintensiven Materialverbrauch niederschlägt. Zuzüglich ist das Risiko, im laufenden Betrieb Ausschuss zu produzieren, deutlich erhöht.

Eine besondere Relevanz nimmt hierbei der Prozessschritt der Stapelbildung, also die Zusammenführung von Kathode, Anode und Separator, ein. Verglichen zu den Rolle-

⁴ International Energy Agency (2024), *Batteries and Secure Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report*. <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions> [26.04.2025].

zu-Rolle-Prozessanlagen in der Beschichtung, Trocknung und Kalandrierung ist der Durchsatz einer aktuellen Stapelanlage etwa um den Faktor 8⁵ geringer, sodass zur Austaktung der Produktionslinie deutlich mehr Stapelanlagen notwendig sind (Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 30).

In der Stapelbildung ist die Stapelgenauigkeit ein wichtiger Parameter in der Qualitätssicherung, der je nach Quelle im Bereich von $\pm 0,1$ mm bis $\pm 0,5$ mm angegeben wird (Kollenda & Husseini et al. 2023; Mooy 2019, S. 52; Schröder & Aydemir et al. 2016; Weinmann 2022, S. 47). Neben der Anlagenpräzision und den Prozessparametern der Stapelanlage beschreibt (Weinmann 2022, S. 122) die Gestaltabweichung der Elektrode als den materialseitigen Parameter, der unabhängig von der eigentlichen Stapelanlage die Stapelgenauigkeit beeinflusst. Die Gestaltabweichung liegt ursächlich jedoch in den vorgeschalteten Prozessschritten, insbesondere hierbei in der Kalandrierung der Kathodencoils und deren Vereinzelung zu Einzelblättern (Mayer & Fleischer 2021).

Das hat zur Folge, dass für die Prozessinbetriebnahme und Ursachenanalyse bei möglichem Ausschuss nicht nur die Betrachtung der Stapelanlagen, sondern auch die Betrachtung der vorgelagerten Prozessschritte erforderlich ist. Gemeinsam mit der großen Anzahl an Stapelanlagen führt dies zu sehr hohen Aufwänden in der Inbetriebnahme und zieht sich bis in den laufenden Betrieb bei der Ursachenanalyse möglichen Ausschusses nach der Stapelbildung.

Der Reduktion der Aufwände stehen hohe und möglicherweise unnötige Toleranzanforderungen gegenüber. Der quantitative Einfluss der Gestaltabweichung der Elektrode auf die resultierende Stapelgenauigkeit bei der Stapelbildung ist Stand heute jedoch nur unzureichend untersucht. Ebenso sind die quantitativen Wirkzusammenhänge in der Entstehung der Gestaltabweichung des Elektrodenblatts weitestgehend unbekannt und wenn dann meist nur qualitativ beschrieben, s. beispielsweise (Schmitt & Raatz 2014; Weinmann 2022, S. 107). Problematisch ist zusätzlich die prozessübergreifende Anzahl der Parameter, die die Gestaltabweichung beeinflussen, und die aufgrund des Aufwands nur eingeschränkt experimentell untersucht werden kann.

Hierfür bietet sich ein Modell des Stapelbildungsprozess für die Prozess- und Anlagenauslegung an, das auf Basis eines erweiterten Prozessverständnis und einem dadurch

⁵ Es ist zu beachten, dass der Faktor im Einzelfall stark variieren kann, da sich der Durchsatz einer Stapelanlage aus der Elektrodengröße und der Verarbeitungsgeschwindigkeit berechnet, s. (Weinmann 2022, S. 47).

eingrenzbareren Parameterraum die resultierende Stapelgenauigkeit bei unterschiedlichen Gestaltabweichungen der zu stapelnden Elektroden berechnen kann. Dadurch können Toleranzeinstellungen aus Sicht der Stapelbildung zielgerichtet vorgegeben werden, sodass Aufwände zur Prozess- und Anlagenentwicklung und Inbetriebnahme reduziert werden können. Durch die großzügigere Auslegung der Toleranzen sinkt ebenfalls das Risiko für späteren Ausschuss im Betrieb der Produktionslinie.

Folglich existiert ein Bedarf, die Anlagen- und Prozessauslegung aus Sicht der Stapelbildung und der erzielbaren Stapelgenauigkeit zu unterstützen, indem ein erweitertes Prozessverständnis der Wirkzusammenhänge vorgeschalteter Prozessschritte geschaffen wird. Insbesondere die Prozessschritte der Kalandrierung und Vereinzeln stehen hierbei im Fokus. Ebenso ist es notwendig ein Modell bereitzustellen, das mithilfe des erweiterten Prozessverständnisses den Prozess der Stapelbildung unter Berücksichtigung der Gestaltabweichungen der Elektroden abbildet.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist das Verständnis der Wirkzusammenhänge der Prozessschritte Kalandrierung und Vereinzeln auf die Gestaltabweichung der vereinzeln Elektrodenblätter sowie deren Einfluss auf die Stapelgenauigkeit bei der Stapelbildung. Darauf basierend soll ein Modell des Stapelprozesses entwickelt werden, das die Gestaltabweichung der Elektrodenblätter in den Zusammenhang mit der Stapelgenauigkeit setzt, wodurch die Prozess- und Anlagenauslegung sowie die spätere Inbetriebnahme optimiert werden können.

Hierzu ist zunächst ein erweitertes Verständnis der drei Einzelprozessschritte und deren Auswirkung auf den jeweiligen Folgeprozess bzw. auf die Stapelgenauigkeit notwendig. Als Parameter wird die Stapelgenauigkeit geometrisch bestimmt, weswegen der Fokus ebenso auf die geometrischen Zwischenprodukteigenschaften der drei Prozessschritte gelegt wird. Aus dem vertieften Prozessverständnis sollen die relevanten Parameter identifiziert werden, die die Stapelbildung im Hinblick auf die resultierende Stapelgenauigkeit als wichtigen Qualitätsparameter beeinflussen. Darauf basierend soll ein geeignetes Modell abgeleitet werden, das unter Berücksichtigung der identifizierten Parameter die Stapelgenauigkeit berechnen kann, sodass Einflüsse von Toleranzen in den identifizierten Parameter schnell und kostengünstig untersucht werden können.

nen. Das entwickelte Modell soll durch experimentelle Untersuchungen an einem Versuchsstand zur Einzelblattstapelbildung validiert werden, sowie eine exemplarische Anwendung aufgezeigt werden.

Aus der Zielsetzung ergibt sich für die vorliegende Arbeit der folgende Aufbau. In Kapitel 2 werden die Grundlagen von Batteriezellen und deren Fertigung aufgezeigt, wobei der Fokus auf die drei Herstellungsprozesse Kalandrierung, Vereinzeln und Stapelbildung gelegt wird. Darauf aufbauend wird der Stand der Forschung und Technik der drei Prozesse diskutiert, sowie auf Modellierungsansätze in der Batteriezellfertigung eingegangen. In der Diskussion der Modellierungsansätze wird zwischen Produkt- und Prozessmodellierung unterschieden. Auf Basis der Analyse des Stands der Forschung und Technik wird das Defizit abgeleitet, das es im Hinblick auf die Zielerreichung zu lösen gilt.

Darauffolgend werden in Kapitel 3 die Zielsetzung präzisiert und die Vorgehensweise herausgearbeitet, mit der die Zielsetzung mit Behebung des Defizits erreicht werden soll.

Aufgrund verschiedener Variationen in der Prozessführung der Stapelbildung wird in Kapitel 4 eine systematische Analyse durchgeführt, sodass ein Referenzprozess für die Einzelblattstapelbildung abgeleitet werden kann, auf Basis dessen die Einflussgrößen auf die Stapelgenauigkeit identifiziert werden können.

In Kapitel 5 steht die geometrische Charakterisierung der vereinzeln Kathodenblätter im Fokus, deren Gestaltabweichungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter-einstellung bei der Kalandrierung analysiert werden. Hierfür werden die geometrischen Merkmale der Kathodenbahn direkt nach der Kalandrierung sowie deren Auswirkung auf das Kathodenblatt nach der Vereinzeln untersucht.

Die vereinzeln Kathodenblätter werden mit den jeweiligen Gestaltabweichungen in Kapitel 6 als Eingangsparameter für die Stapelbildung verwendet und experimentell der Einfluss auf die Stapelgenauigkeit ermittelt. Es wird zunächst ein spezieller Versuchsstand entwickelt und aufgebaut, anhand dessen die Einzelblattstapelbildung, unterteilt in die Subprozesse Ausricht- und Greifprozess, Handhabungsprozess, Ablageprozess und Niederhalter-Greifer-Stapel-Interaktion, quantitativ untersucht wird.

Aus den gewonnenen Ergebnissen werden die relevantesten Parameter identifiziert, die in einem Modell für die Stapelgenauigkeit abgebildet werden müssen, welches in Kapitel 7 entwickelt wird. Hierzu wird ein Finite-Elemente-Modell aufgebaut, das den

Einzelblattstapelprozess mit den notwendigen Parametern so abbildet, dass eine Aussage über die erzielbare Stapelgenauigkeit getroffen werden kann. Zur zielgerichteten Abbildung des Kathodenmaterialverhaltens wird eine Methode entwickelt, verifiziert und in das Modell implementiert. Das Finite-Elemente-Modell wird anschließend entsprechend parametrisiert und mittels der in Kapitel 6 durchgeführten experimentellen Versuche validiert. Exemplarisch wird das Modell anschließend für einen ausgewählten Anwendungsfall verwendet sowie abschließend bewertet.

Die vorliegende Arbeit endet mit Kapitel 8 und einer Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse sowie einem Ausblick für weitere, noch offene Forschungsfragestellungen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung und Technik

Zur Einordnung der in der Arbeit erzielten Ergebnisse werden die erforderlichen Grundlagen von LIB und deren Herstellung zusammengefasst. Anschließend werden relevante Arbeiten aus dem Stand der Forschung und Technik zur Kalandrierung, der Vereinzelung und insbesondere der Stapelbildung aufgegriffen und analysiert, s. Kapitel 2.2.2–2.2.4. Daraufhin werden in der Literatur existierende Modellierungsansätze im Hinblick auf die Batteriezelle und den Stapelprozess vorgestellt, s. Kapitel 2.3. Basierend auf der analysierten Literatur wird abschließend das Defizit im Stand der Forschung abgeleitet, woran die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit anknüpfen, s. Kapitel 2.4.

2.1 Lithium-Ionen-Batteriezellen

Batteriezellen werden aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialsysteme gefertigt und für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert. Aufgrund der hohen Energiedichte und Zyklenstabilität, werden insbesondere LIB heutzutage in vielfältigen Applikationen, wie beispielsweise in Smartphones, Notebooks oder stationären Speichern, eingesetzt (Moeller 2018, S. 8). Nicht zuletzt sind LIB ein wesentlicher Befähiger der Elektromobilität (Doppelbauer 2020, S. 146; Leuthner 2018, S. 14). Aufgrund deren Relevanz und Aktualität fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf LIB mit flüssigem Elektrolyten, wofür in Kapitel 2.1.1 zunächst deren Funktionsweise und grundlegenden Komponenten und in Kapitel 2.1.2 typische Bauformen und Formate vorgestellt werden.

2.1.1 Funktionsweise und grundlegende Komponenten

LIB sind grundsätzlich aus vielen galvanischen Zellen zusammengeschaltet, die jeweils aus zwei räumlich getrennten Elektroden und einem ionenleitenden Elektrolyten bestehen (Ketterer & Karl et al. 2009, S. 3). Die räumliche Trennung der beiden Elektroden stellt dabei ein ionendurchlässiger Separator sicher. Die Elektroden bestehen aus elektrochemisch umsetzbaren Materialien, dem sog. Aktivmaterial, und sind auf einem elektrisch leitenden Stromsammler beschichtet (Ketterer & Karl et al. 2009, S. 3).

Als Konvention ist festgelegt, dass die Elektrode, die während des Entladevorgangs als Elektronenquelle dient, durchgängig als Anode, und die Elektrode, die während des Entladevorgangs als Elektronenverbraucher dient, als Kathode bezeichnet wird (Kurzweil 2018, S. 168).

Die Funktionsweise lässt sich nach (Doppelbauer 2020, S. 148) am Beispiel eines Entladevorgangs wie folgt beschreiben. Zunächst werden die in der Anode eingelagerten Lithium-Ionen an die Grenzschicht zwischen Anode und Elektrolyt transportiert. Während des Transportvorgangs scheidet das Lithium-Ion ein Elektron ab. Nach Erreichen der Grenzschicht wird das Lithium-Ion an den Elektrolyten übergeben, das abgeschiedene Elektron hingegen wandert zum Stromsammler zurück, wo es über die elektrische Verbindung und den Verbraucher zur positiven Kathode fließt. Dadurch ergibt sich der äußere elektrische Stromfluss und Elektronen werden durch den Stromsammler in das Metalloxid der Kathode geführt. Das Lithium-Ion im Elektrolyten bewegt sich durch den Separator ebenfalls zum Metalloxid. Dort kommt es zu einer Ladungsreaktion mit den Elektronen und die Lithium-Ionen werden in das Gitter der Metallverbindung eingelagert. (Doppelbauer 2020, S. 148)

Die Einlagerung von Ionen wird dabei als Interkalation, die Auslagerung entsprechend als Deinterkalation bezeichnet (Ketterer & Karl et al. 2009, S. 4). Der Aufbau und die Funktionsweise einer Batteriezelle sind in Abbildung 2-1 schematisch dargestellt.

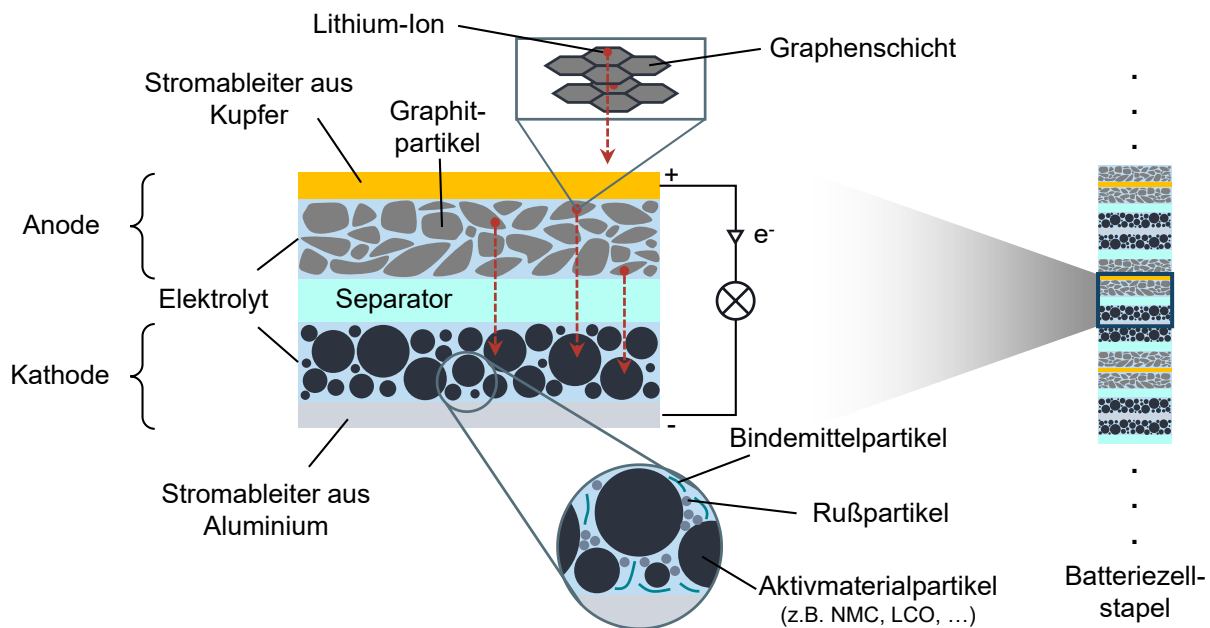


Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batteriezelle beim Entladevorgang in Anlehnung an (Bold 2023, S. 8; Vuorilehto 2013, S. 22)

Als ein wichtiger Parameter ist die Energiedichte der Batteriezelle zu sehen, wobei zwischen gravimetrischer und volumetrischer Energiedichte unterschieden wird. Je nach Betrachtung wird die relative Energiedichte des Energiespeichers auf das Volumen,

also die volumetrische Energiedichte, oder auf die Masse, also die gravimetrische Energiedichte, bezogen (Sterner & Bauer 2017, S. 41).

In kommerziellen LIB werden für Anodenaktivmaterialien überwiegend unterschiedliche Variationen von Graphit genutzt, beispielsweise Naturgraphit oder künstlicher Graphit (Sauer & Ringbeck 2024, S. 131). Zur Steigerung der Energiedichte werden in einigen Applikationen auch Teile des Graphits durch Silizium ersetzt, wodurch mehr Lithium pro Masse eingelagert werden kann. Problematisch ist allerdings die deutlich höhere Volumenzunahme bei der Interkalation von Lithium in Silizium als in Graphit mit etwa 300 % gegenüber 10 %, was zu Problemen hinsichtlich der Lebensdauer führen kann (Sauer & Ringbeck 2024, S. 131). Darüber hinaus finden beispielsweise auch amorpher Kohlenstoff, Lithiumtitanat oder Lithiummetall ihre Anwendung in Forschung und Industrie. (Kurzweil 2018, S. 177–180; Sauer & Ringbeck 2024, S. 131–132)

Als Kathodenaktivmaterialien werden meist Übergangsmetallverbindungen verwendet, die sich aufgrund der Kristallstruktur in die drei Gruppen Schichtoxide, Spinelle und Phosphate unterteilen lassen (Graf 2018, S. 29). Die Struktur der Materialien definiert die jeweilige ionische Leitfähigkeit durch die Beweglichkeit der Lithium-Ionen (Kurzweil 2018, S. 190). Als Schichtoxide werden Lithium-Metall-Oxide (LiMO_2) eingesetzt, wobei als Metalle Nickel (Ni) und/oder Cobalt (Co) und/oder Mangan (Mn) und/oder Aluminium (Al) in unterschiedlichen stöchiometrischen Verhältnissen verwendet werden. Ein bekannter Vertreter von Schichtoxiden ist beispielsweise $\text{Li}_{1-x}(\text{Ni}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33})\text{O}_2$, das oft als NMC111 bezeichnet wird, wobei die Zahlen den jeweiligen Anteil der Metalle anzeigen. Aktuell geht der Trend vermehrt in Richtung hochnickelreicher Materialien, beispielsweise NMC811, mit dem Bestreben, Cobalt als seltenes und damit teures Element zu reduzieren. (Graf 2018, S. 30; Sauer & Ringbeck 2024, S. 131)

Während für die Konsumelektronik das Schichtoxid Lithium-Cobalt-Oxid (LCO) weit verbreitet ist, werden für automobiler Anwendungen häufig die Schichtoxide NMC und Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (NCA) verwendet (Houache & Yim et al. 2022). Auch Lithium-Eisen-Phosphate (LFP) sind aufgrund ihrer Zyklenstabilität und vergleichsweise günstigen Materialkosten in elektrischen Fahrzeugen weit verbreitet (Houache & Yim et al. 2022). Die konkrete Auswahl des Materials ist dabei jedoch immer eine Abwägung der Vor- und Nachteile aus den Aspekten Sicherheit, Kosten, Energiedichte, Leistung und Lebensdauer (Houache & Yim et al. 2022). Insbesondere aber die hohe realisierbare Energiedichte von NMC-Materialien rücken diese in den Fokus bei dem Wunsch nach einer hohen Reichweite von elektrischen Fahrzeugen. Aus diesem

Grund wird sich in der vorliegenden Arbeit auf das Schichtoxid NMC fokussiert, wobei die konkreten Materialparameter an den entsprechenden Stellen der Arbeit erläutert werden. Für die weitere Detaillierung der Spinelle und Phosphate wird auf einschlägige Literatur, beispielsweise (Graf 2018; Ketterer & Karl et al. 2009; Kurzweil 2018), verwiesen.

Sowohl das Anodenaktivmaterial als auch das Kathodenaktivmaterial werden auf Metallfolien beschichtet, die als Stromableiter dienen, s. Abbildung 2-1. Typischerweise werden für graphitbasierte Anoden Kupferfolien und für Kathoden Aluminiumfolien verwendet (Wurm & Oettinger et al. 2018, S. 55). Typische Dicken der Kupferfolie bewegen sich zwischen 6 und 10 μm , bei der Aluminiumfolie zwischen 12 und 20 μm (Kwade & Haselrieder et al. 2018).

Zu den Aktivmaterialien sind sowohl bei Anode als auch bei Kathode polymere Binder beigemischt, die als Matrix für die Aktivmaterialien fungieren und die Haftung an der Metallfolie und somit auch die Verarbeitbarkeit während der Produktion gewährleisten. Darüber hinaus werden auch Additive, beispielsweise Rußpartikel, beigemischt, die die Leitfähigkeit der Elektrode unterstützen. (Ketterer & Karl et al. 2009, S. 20)

Der für die räumliche Trennung von Anode und Kathode verantwortliche Separator schützt die Batteriezelle vor Kurzschlüssen und besteht zumeist aus Polyolefinen, anorganischen Kompositen oder Vliesstoffen aus natürlichen oder synthetischen Fasern mit einer Dicke zwischen etwa 8 bis 25 μm (Kurzweil 2018, S. 223).

Damit die Ionen durch den Separator gefördert werden können, werden Elektrolyte verwendet, die ionisch leitfähig sind und die Lithium-Ionen zwischen Anode und Kathode transportieren. Flüssige Elektrolyte bestehen typischerweise aus einem Leitsalz, organischem Lösemittel und Additiven. (Kurzweil 2018, S. 205–209)

Für die spätere Anwendung werden die Komponenten der Batteriezelle in ein definiertes Format verpackt, sodass die Zelle in die jeweilige Applikation eingesetzt werden kann. In Kapitel 2.1.2 werden hierzu gängige Bauformen und Formate vorgestellt.

2.1.2 Bauformen und Formate

Die häufigsten Bauformen von LIB sind die Prismatische Zelle, die Pouchzelle und die Rundzelle, s. Abbildung 2-2. Prismatische Zellen und Rundzellen haben ein starres, tiefgezogenes Gehäuse aus Edelstahl oder Aluminium, während Pouchzellen in einem mehrlagigen, flexiblen Folienverbund mit einem Kern aus Aluminium verpackt werden

(Pettinger 2013, S. 228–229). Im Bereich der Elektromobilität zeichnet sich bislang keine dominante Bauform auf dem Markt ab. (Sauer & Ringbeck 2024, S. 140).

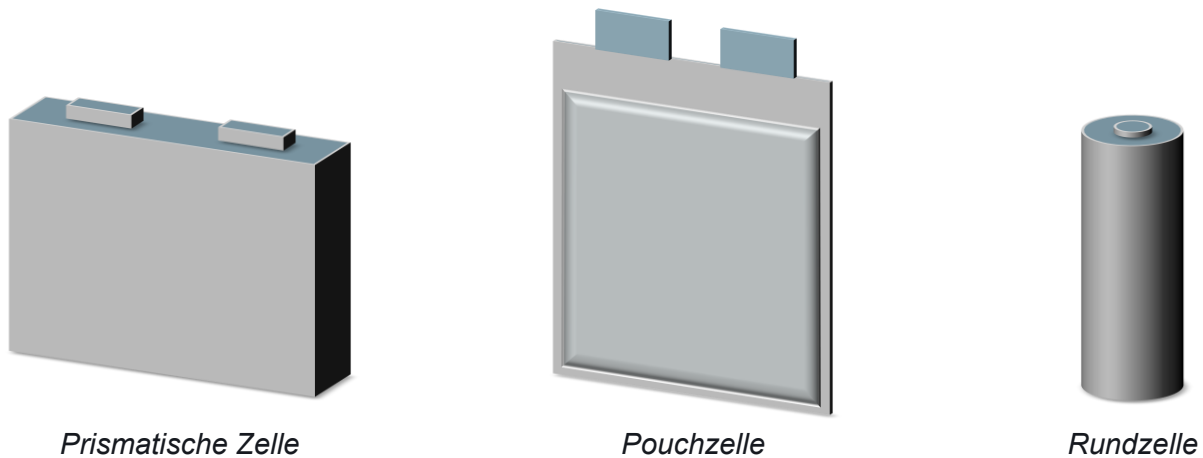


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung gängiger Bauformen für Lithium-Ionen-Batteriezellen nach (Sauer & Ringbeck 2024, S. 139)

Darüber hinaus gibt es Bestrebungen, formatflexible Batteriezellen speziell für die jeweilige Anwendung zu entwickeln und mittels agilen Produktionssystemen wirtschaftlich herzustellen (Fleischer & Fraider et al. 2022; Gandert & Mühlport et al. 2024). Auch industriell werden beispielsweise bereits L-, dreiecks-, hexagon- oder C-förmige Batteriezellen angeboten (Shenzhen Grepow Battery Co., Ltd. 2024)⁶. Hinsichtlich der Verpackung eignet sich für formatflexible Batteriezellen insbesondere die Ausführung als Pouchzelle (Müller-Welt & Bause et al. 2023).

Innerhalb ihrer Verpackungen können die Anode-Separator-Kathode-Verbünde nach (Bach 2017, S. 59; Weinmann 2022, S. 11) in 13 verschiedene Verbundbauweisen eingeteilt werden und prozessseitig auf die drei Fügeverfahren Wickeln, Falten und Stapeln aufgeteilt werden, wobei teilweise auch Mischformen zur Verbundherstellung existieren. Ein wesentliches Merkmal ist hierbei die Verarbeitung der Elektroden und des Separators als durchgängige Bahn oder in Einzelblätter. In Kapitel 2.2.4 werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Zellverbundbauweisen nochmals aufgegriffen und detailliert.

Nach (Pettinger 2013, S. 221; Weinmann 2022, S. 13) müssen alle Verbundbauweisen hinsichtlich der Funktion der Batteriezelle die folgenden drei Grundregeln erfüllen:

⁶ Shenzhen Grepow Battery Co., Ltd. (2024), *Shenzhen Grepow Battery Co., Ltd.* <https://www.grepow.com/shaped-battery.html> [25.02.2024].

- größere Kapazität der Anodenfläche gegenüber der Kathodenfläche sowie einen homogenen Abstand beider Flächen;
- dauerhafte elektrische Trennung von Kathode und Anode;
- vollständige Überdeckung der Kathodenfläche von der Anodenfläche (Pettinger 2013, S. 221; Weinmann 2022, S. 13).

Im Hinblick auf die Batterieentwicklung gilt die Automobilindustrie aktuell als maßgeblicher Treiber. Zur Vergrößerung der Aktivmaterialanteile in der Batterie sowie zur Verringerung der Anzahl der zu integrierenden Zellen in das Batteriepack gibt es Bestrebungen, die Zellgrößen zu erhöhen (Kwade & Haselrieder et al. 2018; Samba & Omar et al. 2014). Dies zeigt sich beispielsweise bei Rundzellen, bei denen ein Trend zu größeren Durchmessern zu beobachten ist (Kampker & Heimes et al. 2023). Für Pouch- und Prismatische Zellen gibt (Weinmann 2022, S. 17) auf Basis einer Marktrecherche einen Korridor von etwa 50–500 mm x 30–325 mm als gängige Formate an.

2.2 Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen

In den folgenden Kapiteln werden wichtige Aspekte der Herstellung von LIB vorgestellt. Nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Ausführungen von Batteriezellen gibt es für die Herstellung im Detail viele verschiedene Prozesslösungen (Weinmann 2022, S. 21). Zur Fokussierung wird hier die Herstellung von Pouchzellen vorgestellt, wobei viele Prozessschritte zellformatunabhängig sind. In einem ersten Schritt wird ein Überblick über die wesentlichen Prozessschritte gegeben, s. Kapitel 2.2.1. Anschließend erfolgt eine detaillierte Analyse der drei für die vorliegende Arbeit relevanten Prozessschritte Kalandrierung, Vereinzelung und Stapelbildung, s. Kapitel 2.2.2–2.2.4.

2.2.1 Allgemeine Prozesskette

Grundsätzlich kann die Batteriezellfertigung in die drei Abschnitte Elektrodenfertigung, Zellausbauelementfertigung und Zellfinalisierung unterteilt werden (Heimes & Dorn et al. 2024, S. 260). Da die Feuchtigkeit in Batteriezellen einen negativen Effekt auf die Funktionalität besitzt, werden viele Prozessschritte in einer trockenen Atmosphäre mit Taupunkttemperaturen von -20 °C bis -50 °C durchgeführt (Henschel & Kößler et al. 2024). In Abbildung 2-3 ist die Abfolge der Hauptprozessschritte dargestellt, auf die im Folgenden detailliert eingegangen wird.

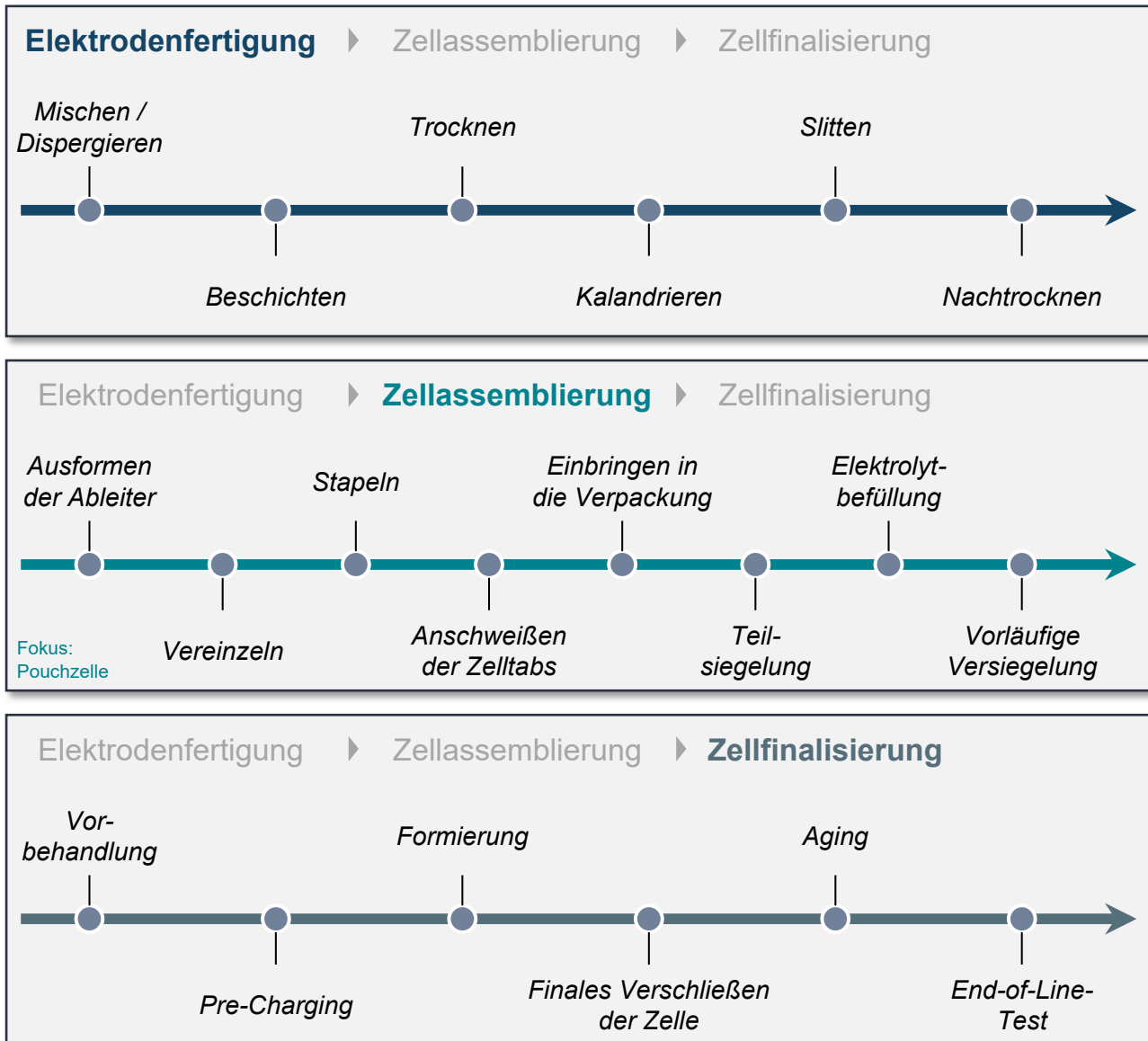


Abbildung 2-3: Hauptprozessschritte bei der Herstellung von Batteriezellen nach (Heimes & Dorn et al. 2024)

Ausgangsbasis für die Elektrodenfertigung ist das Vermengen der pulverbasierten Komponenten Aktivmaterial, Binder und Additive in einem Trockenmischprozess. Für die spätere Beschichtung werden die Komponenten mit einem Lösemittel gemischt, das sog. Dispergieren. Das Ziel ist eine homogene Verteilung der Komponenten, die Vermeidung von Agglomeraten sowie eine optimale Viskosität zur Weiterverarbeitung. Die entstehende Paste wird Slurry genannt. Der Slurry wird anschließend auf die entsprechenden Stromableiterfolien, auch Substrat genannt, beschichtet, was im industriellen Maßstab meist in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess durchgeführt wird und bis zur späteren Vereinzeln beibehalten wird. Im industriellen Kontext wird üblicherweise für die Beschichtung eine Schlitzdüse verwendet, die auf die gewünschte Breite eingestellt ist.

Die Stromableiterfolie wird unter der Schlitzdüse bewegt, sodass sich über den Abstand der Schlitzdüse zur Folie und die Viskosität des Slurrys die entsprechende Schichtdicke einstellt. Für die spätere Ausformung der Ableiter und Sicherstellung einer homogenen Beschichtungsdicke besitzt das Substrat immer einen unbeschichteten Rand. Je nach gewünschter Zellverbundbauweise werden unterschiedliche Beschichtungsmuster auf das Substrat aufgebracht, s. Abbildung 2-4. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen legen eine durchgängig und einbahnig beschichtete Elektrode mit einem beidseitigen unbeschichteten Substratrand zugrunde. (Heimes & Dorn et al. 2024; Pettinger & Kampker et al. 2018)

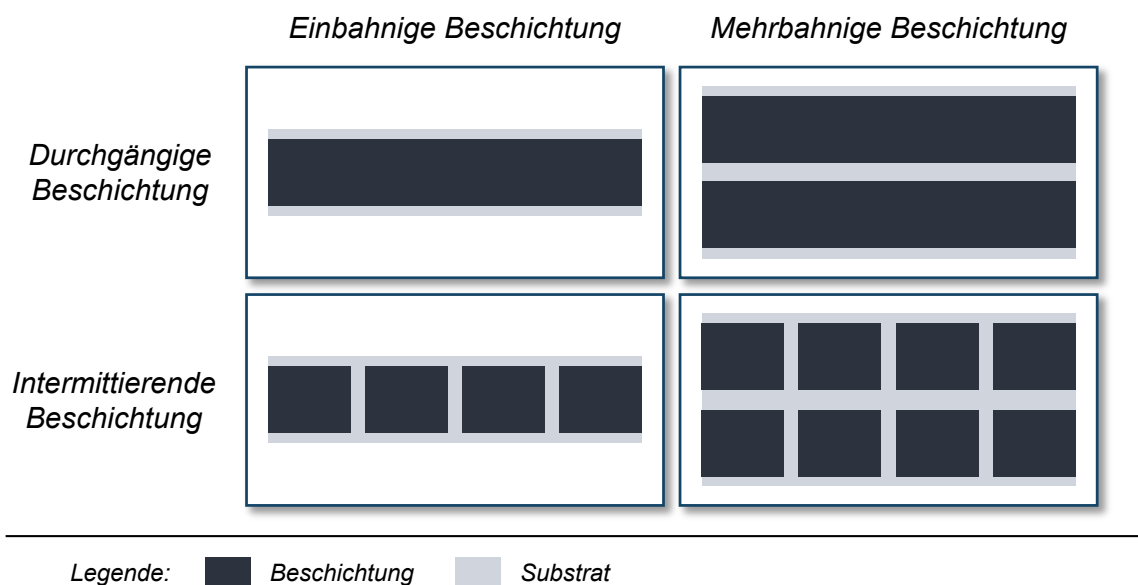


Abbildung 2-4: Typische Beschichtungsmuster für die Elektrodenfertigung in Anlehnung an (Spiegel & Heckmann et al. 2022; Weinmann 2022, S. 26)

Da der Slurry nach der Beschichtung noch flüssig ist, folgt dem Beschichtungsprozess direkt ein Trocknungsprozess. Das übergeordnete Ziel der Trocknung ist die Entfernung des Lösemittels aus der Beschichtung in möglichst kurzer Zeit und unter minimalem Energieeinsatz sowie die Ausbildung und Verfestigung einer porösen Beschichtungsstruktur. Da die Anforderungen teilweise gegenläufig sind, ist der Trocknungsprozess ein auf den Anwendungsfall angepasstes zu lösendes Optimierungsproblem. Der Trocknungsprozess ist einer der energieintensivsten Prozessschritte in der Batteriezellfertigung. Nach der Trocknung liegen beschichtete Elektroden mit einer porösen Struktur aus Aktivmaterial, Binder und Additiven vor. Da die Porosität ein wichtiges Kriterium für die späteren elektrochemischen Eigenschaften ist, wird im Anschluss an die Trock-

nung die Beschichtung gezielt verdichtet. Hierzu erfolgt ein Walzprozess, die sog. Kalandrierung. Aufgrund der Relevanz der Kalandrierung für die vorliegende Arbeit wird dieser Prozessschritt in Kapitel 2.2.2 detailliert beschrieben, sodass hier keine weitere Vertiefung erfolgt. Zur Entfernung der Restfeuchte werden die kalandrierten Elektroden abschließend nachgetrocknet, sodass die Elektrodenfertigung abgeschlossen ist. (Heimes & Dorn et al. 2024; Kaiser & Wenzel et al. 2014; Knehr & Kubal et al. 2024; Pettinger & Kampker et al. 2018)

Die Prozessführung der Elektrodenfertigung ist für alle Batteriezellbauformen weitestgehend gleich. In der Zellausfertigung müssen je nach gewünschter Bauform unterschiedliche Prozessrouten genommen werden, wobei hier die Fertigung von Pouchzellen mit Einzelblattelektroden detailliert wird, da diese für die Arbeit am relevantesten ist.

In Abhängigkeit des Beschichtungsmusters erfolgt ein Längsschneiden der Elektrode, das sog. Slitting, bei dem die Breite und damit bereits eine finale Kante des späteren Elektrodeneinzelblatts hergestellt wird. Als Trennverfahren werden sowohl mechanische Schneidverfahren mittels Rundmesser als auch Laserverfahren eingesetzt. Grundsätzlich wichtige Aspekte sind saubere, partikel- und gratfreie Schnittkanten, die Absaugung der entstehenden Partikel an der Schneide, sodass diese sich nicht auf der Elektrode ablagern können, sowie die Einhaltung der Toleranzen, da bereits ein Teil des Einzelblattabmaßes definiert wird. Der Prozess wird weiterhin als Rolle-zu-Rolle-Prozess ausgeführt. Je nach Literaturquelle wird das Slitting noch der Elektrodenfertigung zugeordnet. Im Anschluss an das Längsschneiden erfolgt die Konfektionierung zu Einzelblattelektroden. Dieser Schritt wird für Pouchzellen meist in das Ausformen der Ableiter, das sog. Notching, und die eigentliche Vereinzelnung der Elektrodenbahn zu Einzelblattelektroden unterteilt. Dies ist auch der Übergang von einer kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozessführung hin zu einer diskreten Prozessführung. Die vereinzeln Elektroden werden anschließend in den Prozessschritt der Stapelbildung übergeben, woraus dann die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Zellverbände gebildet werden. Wie bei der Kalandrierung werden die Prozessschritte Vereinzelnung und Stapelbildung in den Kapiteln 2.2.3 und 2.2.4 gesondert behandelt. Der Zellverbund wird nach der Stapelbildung mit Hilfe von Klebebändern gegen das Verrutschen gesichert. Im Anschluss erfolgt das Anschweißen der Zelltabs, bei dem artgleiche Elektrodenblätter an den Ableiterfährchen miteinander kontaktiert werden und zusätzlich jeweils ein Zelltab befestigt wird. Nach dem Anschweißen der Tabs werden die Zellverbände in die Ver-

packung eingebracht. Für Pouchzellen werden tiefgezogene Halbschalen aus Pouchfolie, einem Mehrlagenfolienverbund aus Aluminium und verschiedenen Kunststoffen, verwendet, in die die Zellverbände eingelegt werden. Durch Einbringen von Wärme werden die Innenseiten der Pouchfolien an drei Seiten der Zelle miteinander versiegelt. Anzumerken ist, dass zunächst mehr Volumen eingesiegelt wird, als eigentlich benötigt. Der Grund liegt in der späteren Formierung, da dort Gase entstehen, die sich in dem überschüssigen Verpackungsbereich, auch Gastasche genannt, sammeln können. Als letzten Schritt in der Zellausbaubau wird durch die vierte, noch nicht versiegelte Seite der Pouchzelle das Elektrolyt meist unter Vakuum eingebracht, sodass alle Flächen der Anoden und Kathoden benetzt werden. Zur Vermeidung des Elektrolytaustritts und des Eintritts von Feuchtigkeit wird anschließend die letzte offene Seite der Batteriezelle versiegelt, sodass die Zellausbaubau abgeschlossen ist und die Zellfinalisierung beginnt. (Heimes & Dorn et al. 2024; Pettinger & Kampker et al. 2018; Weinmann 2022)

Bei der Zellfinalisierung wird zunächst eine Vorbehandlung durchgeführt, um das injizierte Elektrolyt durch definiertes Walzen oder gezielte Vibrationen schneller in die Poren der Beschichtung zu transportieren. Anschließend erfolgt durch einen Pre-Charging-Prozess das Laden der Batteriezelle bis zu einem geringen Ladezustand, um mögliche Korrosionen am Ableitertab zu verhindern und erste entstehende Gase vorab zur Reduktion des Drucks bei der Formierung zu entlassen. In der Formierung wird die LIB zum ersten Mal vollständig ge- und entladen. Es bildet sich die sogenannte „Solid-Electrolyte-Interface“-Schicht aus. Das während der Formierung entstehende Gas entweicht mittels äußeren Drucks in die Gastasche, die durch eine weitere Siegelnaht verschlossen und abgetrennt wird. Abschließend findet das Aging und der „End-of-Line“-Test statt, wobei die Batteriezellen ohne weitere Stromzufuhr gelagert und getestet werden, um die spätere Funktionalität sicherzustellen. (Heimes & Dorn et al. 2024)

In den Kapiteln 2.2.2 bis 2.2.4 werden die Prozessschritte Kalandrierung, Vereinzelung und Zellstapelbildung detailliert.

2.2.2 Kalandrierung

Zur Detaillierung der Kalandrierung wird zunächst auf den grundsätzlichen Prozessablauf eingegangen und typische Material- und Prozesskenngößen diskutiert, s. Kapitel 2.2.2.1. Im Anschluss werden auftretenden Defekte der Elektroden nach der Kalandrierung beschrieben und deren Ursachen analysiert, s. Kapitel 2.2.2.2. Ziel des Kapitels

ist es, das notwendige Prozessverständnis und den aktuellen Stand der Forschung im Bereich typischer Defekte bei der Kalandrierung darzulegen, da hierauf ein Teil der späteren Experimente aufbaut. Da die geometrischen Defekte bei Kathoden deutlich stärker ausgeprägt sind, ist zu erwarten, dass sich auch deren Einfluss auf die Gestalt des Einzelelektrodenblattes stärker auswirkt. Aus diesem Grund wird der Fokus auf die Kalandrierung von Kathoden gelegt.

2.2.2.1 Prozessablauf und Material- und Prozesskenngrößen

Bei der Kalandrierung wird die getrocknete und poröse Aktivmaterialbeschichtung der Elektrode mittels eines Walzprozesses verdichtet, s. Abbildung 2-5.

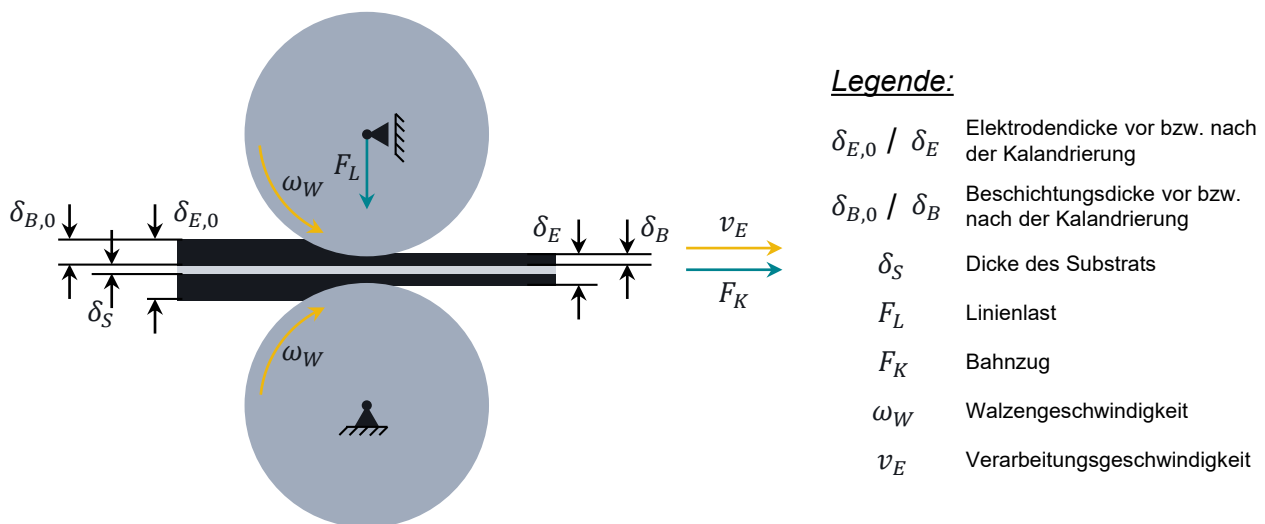


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Kalandrierprozesses in Anlehnung an (Bold 2023, S. 20; Meyer 2019, S. 15)

Zur Einordnung in den Gesamtprozess der Batteriezellfertigung lassen sich die Ziele der Kalandrierung nach (Schreiner 2023, S. 22–23) wie folgt zusammenfassen:

- Steigerung der volumetrischen Energiedichte der späteren Batteriezelle;
- Erhöhung der Haftfestigkeit der Beschichtung am Stromsammler und dem Partikelkontakt untereinander sowie Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit;
- Nivellierung der Schichtdicke und Homogenisierung der mechanischen Schichteigenschaften zur Verbesserung des Alterungsverhalten der LIB (Schreiner 2023, S. 22–23).

Prozesseitig wird über einen definierten Spaltabstand zwischen den Walzen oder eine definierte Linienlast F_L die initiale Schichtdicke der Beschichtung $\delta_{B,0}$ verringert, was zu einer höheren Dichte der Beschichtung ρ_B führt. Innerhalb der Beschichtung und der

Bindermatrix werden die Partikel neu positioniert und Hohlräume geschlossen. Je nach Höhe der Linienlast drücken sich die Partikel in den Stromsammelr, sodass dort eine Art „Golfballmuster“ entsteht, wobei eine zu hohe Linienlast zum Bruch der Partikel führen kann (Yang & Xie et al. 2023; Zhang & Huang et al. 2022).

Zuzüglich zur Beschichtungsdichte ρ_B lässt sich die Verdichtung auch über den Verdichtungsgrad Π_B charakterisieren. (Haselrieder 2017, S. 76) gibt diesen mit Formel 2-1 an, wobei Π_B den Verdichtungsgrad, δ_E die erzielte Elektrodendicke und $\delta_{E,0}$ die initiale Elektrodendicke beschreibt.

$$\Pi_B = 1 - \frac{\delta_E}{\delta_{E,0}} \quad \text{Formel 2-1}$$

Eine wichtige Kennzahl ist dabei die Porosität der Beschichtung Φ_B , die das Verhältnis zwischen Hohlraum und Gesamtvolumen der Beschichtung ausdrückt und sich nach (Beuse & Fingerle et al. 2021) über den formalen Zusammenhang in Formel 2-2 beschreiben lässt. ρ_{theo} ist dabei die Dichte der festen Beschichtungsbestandteile.

$$\Phi_B = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_{theo}} \quad \text{Formel 2-2}$$

Typische Werte der Porosität bewegen sich im Bereich von 50–70 % vor und 20–40 % nach der Kalandrierung (Abollahifar & Cavers et al. 2023). Experimentell kann sie beispielsweise mit der Quecksilberporosimetrie ermittelt werden (Beuse & Fingerle et al. 2021). Stand heute lässt sie sich jedoch nicht bzw. nur mit sehr hohem Aufwand inline messen (Bold 2023, S. 28; Rupnowski & Ullsh et al. 2018).

Es ist naheliegend, dass sich durch die Kalandrierung auch die mechanischen Eigenschaften der Kathode ändern. So zeigt (Zheng & Tan et al. 2012), dass bei sinkender Porosität sowohl der Elastizitätsmodul (E-Modul) als auch die Zugfestigkeit zunehmen und das Material spröder wird, was auch durch eigene Versuche bestätigt werden kann. Ebenso ändert sich die Haftfestigkeit zwischen Beschichtung und Stromsammelr insofern, als dass sie bei sinkender Porosität der Beschichtung zunächst fällt und dann wieder ansteigt (Schreiner & Oguntke et al. 2019). Begründen lässt sich die Senkung der Haftfestigkeit durch die unterschiedlichen Dehnungen der Beschichtung und des Stromsammelrs, wodurch Scherkräfte auftreten (Meyer 2019, S. 124). Die wieder ansteigende Haftfestigkeit bei weiterer Verringerung der Porosität lässt sich durch das Eindringen der Partikel in den Stromsammelr erklären (Meyer 2019, S. 124; Zhang &

Huang et al. 2022). Weiterhin tritt durch das elastisch-plastische Verhalten der Beschichtung nach der Kalandrierung ein Rückfederungseffekt auf, der von der Linienlast und der Massenbeladung m_B , also der Beschichtungsmenge pro Substratfläche, sowie vom Anteil des beigemischten Binders abhängt (Diener & Ivanov et al. 2022). Weitere Aspekte zur mechanischen Charakterisierung von Elektroden werden in Kapitel 2.3.1.2 nochmals aufgegriffen und detailliert.

Zusätzlich zur Veränderung der mechanischen Eigenschaften wird auch die visuelle Oberfläche der Kathode verändert. (Meyer 2019, S. 90) stellt einen Zusammenhang zwischen Glanzwert und Porosität her: Mit sinkender Porosität steigt der Glanz der Kathode, was auch in den durchgeführten Versuchen visuell bestätigt wird.

Entsprechend eines Rolle-zu-Rolle-Prozesses wird die Elektrode nach der Kalandrierung wieder auf ein Coil aufgewickelt.

Im industriellen Umfeld werden Kalander mit Walzendurchmesser zwischen 600 und 1000 mm eingesetzt (Kwade & Haselrieder et al. 2018). Die Verarbeitungsgeschwindigkeit bewegt sich meist im Korridor von 30–100 m min⁻¹ mit Linienlasten von bis zu 4100 N mm⁻¹ und Schichtdickentoleranzen im Bereich von $\pm 2 \mu\text{m}$ oder darunter (BREYER Maschinenfabrik GmbH 2024; CIS Co., Ltd. 2024; Kwade & Haselrieder et al. 2018)^{7,8}. Häufig werden die Walzen temperiert, da dadurch geringere Linienlasten benötigt werden und weniger Beanspruchung in das Material induziert wird sowie Rückfederungseffekte gemindert werden (Schreiner 2023, S. 24). In industriellen oder auch industrienahen Kalandern finden sich häufig auch Einrichtungen zur Aufbringung eines definierten Bahnzugs auf die Kathodenbahn. (Mayer & Wurba et al. 2021) verwenden in ihren Untersuchungen Bahnzüge von bis zu 80 N, während (Bold 2023, S. 103) auch mit Bahnzügen von bis zu 100 N arbeitet. Darüber hinaus besitzt der Bahnzug einen Einfluss auf die Ausbildung von Defekten in den Kathoden, was in Kapitel 2.2.2.2 detailliert wird.

⁷ BREYER Maschinenfabrik GmbH (2024), *BREYER IONPress. Kalander-Technologie*. Herstellung von anspruchsvollen Elektrodenfolien für Lithium-Ionen Batterien. <https://www.breyer-energy.com/index.php?id=146&line=10> [27.02.2024].

⁸ CIS Co., Ltd. (2024), *Roll Press. Creative & Innovative Systems*. <http://www.cisro.co.kr/en/sub01/sub04.html> [27.02.2024].

2.2.2.2 Auftretende Defekte und Ursachen

Bei der Kalandrierung von Elektroden kann eine Vielzahl verschiedener Defekte oder Fehlerbilder auftreten. (Bold & Fleischer 2018) führen hierfür sechs verschiedene Fehlerbilder auf, während (Günther & Schreiner et al. 2019) sechs weitere ergänzen und diese in geometrische, strukturelle und mechanische Fehlerbilder kategorisieren. Nach (Günther & Schreiner et al. 2019) beinhalten die geometrischen Fehlerbilder Änderungen der Elektrodenform, während die strukturellen Fehlerbilder einen Einfluss auf die elektrischen und elektrochemischen Eigenschaften und die mechanischen Fehlerbilder einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Elektrode umfassen. Die Fehlerbilder finden sich in Tabelle 2-1. Anzumerken ist, dass hier zwar von Fehlerbildern gesprochen wird, diese jedoch nicht zwangsläufig zu Ausschuss führen müssen, beispielsweise das Fehlerbild „in das Substrat eingepresste Partikel“ (Günther & Schreiner et al. 2019).

Tabelle 2-1: Auftretende Fehlerbilder an kalandrierten Elektroden nach (Bold & Fleischer 2018; Günther & Schreiner et al. 2019)

Geometrische Fehlerbilder	Strukturelle Fehlerbilder	Mechanische Fehlerbilder
<ul style="list-style-type: none"> • Elektrodenwelligkeit • Wellen am Beschichtungsrand • Folienverprägung, sog. „Wrinkles“ • Säbeleffekt, bzw. auch Cambereffekt genannt 	<ul style="list-style-type: none"> • Versiegelte Oberflächenporen • Ablösung der Beschichtung • Lokale Dichte- & Dicken-schwankungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Rissbildung in der Elektrode • Versprödung der Elektroden • In das Substrat gepresste Partikel • Folienriss • Beschädigung der Partikel

Da in der vorliegenden Arbeit insbesondere Aspekte der geometrischen Fehlerbilder im Fokus stehen, werden diese im Folgenden detailliert, während bei den anderen Fehlerbildern auf (Günther & Schreiner et al. 2019) verwiesen wird. Zuzüglich zu den vier geometrischen Fehlerbildern beschreiben (Wurba & Altmann et al. 2024; Wurba & Klemens et al. 2023) das weitere Fehlerbild der Längsfalten im unbeschichteten Substratrand, was ebenso den geometrischen Fehlern zuzuordnen ist. In der vorliegenden Arbeit wird dieses Fehlerbild jedoch nicht betrachtet, sodass stattdessen auf die entsprechenden Veröffentlichungen verwiesen wird.

Bei den geometrischen Fehlerbildern werden zwei Arten von Welligkeiten unterschieden. Zum einen treten Welligkeiten im mittleren Teil der Beschichtung mit deutlich größeren Amplituden auf („Elektrodenwelligkeit“). Im Randbereich zwischen Beschichtung

und unbeschichtetem Substrat gehen diese Wellen in eine deutlich geringere Amplitude über („Wellen am Beschichtungsrand“), weisen dafür aber eine größere Frequenz auf, s. Abbildung 2-6 a) und b). (Günther & Schreiner et al. 2019)

Hinsichtlich der in der Arbeit verwendeten Namenskonvention werden im Folgenden die Welligkeiten am Rand als „Randwellen“ bezeichnet und die Welligkeiten in der Mitte als „Mittenwellen“.



Abbildung 2-6: Ausgewählte geometrische Fehlerbilder nach der Kalandrierung in Anlehnung an (Günther & Schreiner et al. 2019)

Die Ursachen beider Wellenarten sind in der Längung des beschichteten Bereichs der Elektrode zu finden, während der unbeschichtete Teil der Elektrode prozessbedingt nicht gelängt wird. Durch die Linienlast wird der Beschichtungsbereich zunächst verdichtet. Das Repositionieren der Aktivmaterialpartikel und deren Festigkeit bewirken, dass die Beschichtung zusätzlich auch gelängt wird. Die Längung der Aluminiumfolie wird durch die Beschichtung induziert. Die Aktivmaterialpartikel drücken sich bis zu 2 μm in das Substrat ein, wodurch sich dieses unter der Beschichtung ebenfalls längt (Zhang & Huang et al. 2022). Das beschichtungsfreie Substrat wird aufgrund des fehlenden Kontakts zu den Walzen nicht gelängt, wodurch eine Längendifferenz entsteht. Da sich jedoch der beschichtete Teil der Elektrode durch den unbeschichteten Teil nicht in Laufrichtung ausbreiten kann, weicht die Elektrode vertikal zur Laufrichtung aus und bildet Mittenwellen. Am Beschichtungsrand können sich jedoch keine großen Wellenamplituden aufgrund der Nähe zum unbeschichteten Substrat ausbilden, weswegen dort die Randwellen mit kleineren Amplituden und höheren Frequenzen entstehen. (Bold & Fleischer 2018; Günther & Schreiner et al. 2019; Zhang & Huang et al. 2022)

Zwei Aspekte verstärken zusätzlich die Randwellenbildung. Während des Beschichtungsprozesses können Schichtdickenüberhöhungen von bis zu 5 % der Nenndicke am

Beschichtungsrand auftreten, was bei der Kalandrierung zu einer verstärkten Verdichtung und damit zu verstärkten Spannungsinhomogenitäten und Randwellen führt (Spiegel & Heckmann et al. 2022).

Der zweite Aspekt betrifft die Biegung der Walzen. Zur Aufbringung der Linienlasten werden die Walzen an den außen liegenden Lagerstellen gegeneinander verpresst, wodurch sich die Walzen aufwölben. Das führt zu einer verstärkten Verdichtung an den Beschichtungsändern, während in der Beschichtungsmitte die Verdichtung gemindert wird. Es gibt zwar Gegenmaßnahmen, beispielsweise das Gegenbiegen der Walzen oder einen tonnenförmigen Walzenschliff, die sog. Bombage, allerdings ist der Ausgleich beim Gegenbiegen nicht beliebig groß steuerbar und die Lager werden deutlich stärker belastet. Die Bombage muss als Sondermaschinenelement auf die zu kalandrierende Elektrode ausgelegt werden, wodurch die Flexibilität stark eingeschränkt wird und die Kalandrierung von mehrbahnigen Elektroden problematisch sein kann. (Schüle & Eyerer 2020, S. 126)

Erste Ansätze zur quantitativen Beschreibung der Welligkeiten geben (Mayr & Schreiner et al. 2022). Es wird ein Sensoraufbau mittels Linienlaser beschrieben, womit die Welligkeiten vermessen werden. Erste Messungen geben für einen definierten Elektrodenabschnitt Randwellen im Bereich von 1,36 mm und Mittenwellen im Bereich von 3,22 mm, wobei jeweils die Differenz zwischen Maximum und Minimum der Elektrode gemessen wurde (Mayr & Schreiner et al. 2022). Weitere Quantifizierungsaspekte existieren bei (Bold 2023, S. 114), wobei weniger die quantitative Vermessung der Wellen im Fokus steht, sondern vielmehr ein allgemeines Prozessverständnis der Kalandrierung. Eine tiefergehende Auseinandersetzung mit der Welligkeit der Kathoden nach der Kalandrierung führt (Günther 2023, S. 118–126), wobei der Fokus der quantitativen Untersuchung auf NMC111 liegt. Bei der Variation der Faktoren Massenbeladung, Foliendicke, Walztemperatur und Verdichtungsrate wurden Wellenlängen im Bereich von 35,07 mm bis 48,14 mm und Wellenhöhen zwischen 1,28 mm und 3,32 mm gemessen. Mit NMC622 wurde der Einfluss der Walztemperatur auf die Welligkeit untersucht, wobei die Verdichtungsrate konstant gehalten wurde und der Fokus auf der qualitativen Validierung der Versuche mit NMC111 lag. In der Literatur lassen sich somit zwar quantitative Untersuchung der Rand- und Mittenwellen bei Kathoden finden, allerdings ist nicht klar, wie sich die Welligkeiten bei NMC622 und NMC811 ausbilden. (Günther 2023)

Das Fehlerbild Folienverprägung bzw. Wrinkles ist ebenso in Abbildung 2-6 c) dargestellt. (Günther & Schreiner et al. 2019) führen die Wrinklebildung auf die laterale Verschiebung der Elektrode zurück, da der beschichtete Teil des Materials bei der Kalandrierung nicht nur in Laufrichtung, sondern auch lateral dazu verformt wird. (Bold 2023, S. 44) ergänzt als Ursache das Zusammenspiel der Elektrodenlängung in Laufrichtung mit der Einwirkung des Bahnzugs insbesondere am unbeschichteten Teil der Elektrode, wodurch ein Voreilen des unbeschichteten Substrats erzwungen wird. Darüber hinaus entwickelt (Bold 2023, S. 121–137) ein „Anti-Wrinkle-Modul“ zur Vermeidung von Wrinkles mittels gezielter Längung des unbeschichteten Substratbereichs, was auch bereits als Patent angemeldet ist (Barthel & Bold et al. 2020).

Das letzte in Tabelle 2-1 erwähnte geometrische Fehlerbild, der Säbeleffekt, lässt sich ursächlich ebenfalls auf die Kalandrierung und die damit verbundene Längung des beschichteten Bereichs der Elektrode zurückführen. Allerdings tritt der Effekt erst nach dem Längsschneiden zutage, sodass dieses Fehlerbild in Kapitel 2.2.3 detailliert wird (Günther & Schreiner et al. 2019).

Abschließend ist anzumerken, dass die Bezeichnungen Fehlerbild oder Defekt für die auftretenden Effekte beim Kalandrieren irreführend sein können. Nicht jedes Fehlerbild führt zwangsläufig zu Ausschuss und muss daher insbesondere bei den geometrischen Fehlerbildern im Einzelfall geprüft und mit Toleranzfenstern belegt werden.

2.2.3 Längsschneiden und Konfektionieren

Die Art der Vereinzelung ist abhängig vom Beschichtungsmuster, von der gewünschten Bauform und dem verwendeten Design für den Anode-Separator-Kathode-Verbund (Kwade & Haselrieder et al. 2018). Im Folgenden wird sich auf den Vereinzelungsprozess für Zellstapel mit Einzelblattelektroden fokussiert.

Die industriell etablierte Prozesskette zur Herstellung von Einzelblattelektroden lässt sich in die drei Prozessschritte Längsschneiden (Slitting), Ableiterformen (Notching), und das Ablängen oder auch Vereinzeln unterteilen, s. Abbildung 2-7 (Ma & Schabel et al. 2023).

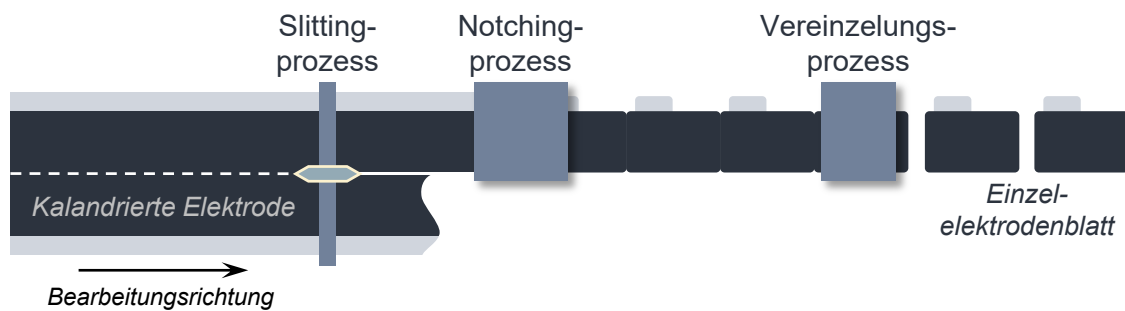


Abbildung 2-7: Industriell etablierte Prozessführung zur Herstellung von Einzelblattelektroden nach (Ma & Schabel et al. 2023; Schabel & Fleischer 2022)

Beim Längsschneiden wird die Elektrode in der Mitte der Beschichtung getrennt, so dass zwei Elektrodencoils entstehen. Als Fertigungsverfahren werden sowohl mechanische als auch thermische Trennverfahren eingesetzt. Bei einem mechanischen Prozess wird die Elektrode mittels rotierendem Rundmesser, das in Bearbeitungsrichtung, der sog. Lauf- oder Bewegungsrichtung des Elektrodencoils, ausgerichtet ist, im Scherschnitt durchtrennt. In einem thermischen Prozess werden Lasersysteme eingesetzt. (Schabel & Fleischer 2022)

Hier setzt auch das noch zu beschreibende geometrische Fehlerbild „Säbeleffekt“ (s. Tabelle 2-1) an, das auf die Kalandrierung zurückgeführt werden kann. Je nach Literaturquelle wird der Säbeleffekt auch als Cambereffekt bezeichnet. Diese Bezeichnung wird auch für die vorliegende Arbeit genutzt. Die Ursache des Cambereffekts liegt in der Längendifferenz zwischen dem beschichteten Bereich der Elektrode und dem unbeschichteten Substratbereich nach der Kalandrierung begründet und tritt nach dem Slitting zutage (Günther & Schreiner et al. 2019). Die entstehende Schnittkante in der Mitte der Elektrode ist länger als die Kante des unbeschichteten Substrats, sodass sich eine Bogen- oder Säbelform bildet, s. Abbildung 2-8 (Günther & Schreiner et al. 2019).

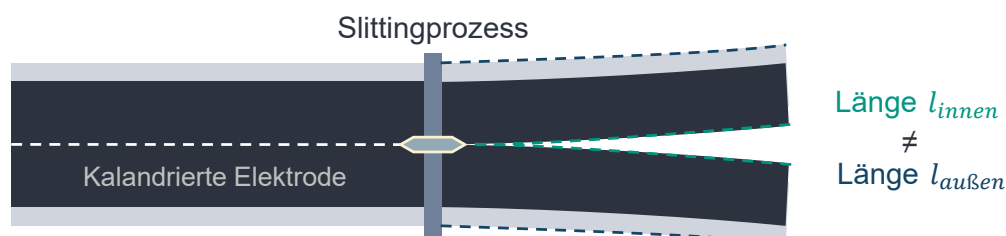


Abbildung 2-8: Exemplarische Darstellung des Cambereffekts in Anlehnung an (Weinmann 2022, S. 31)

(Tran & Lindner et al. 2023) untersuchen NMC622-Kathoden hinsichtlich des Camber-effekts und messen zwischen 0,01 mm und 1,94 mm Längung pro 25 cm bei einer Verdichtung der Beschichtung auf $3,0 \text{ g cm}^{-2}$. Je nach Ausprägung des Effekts kann dieser zu Problemen in den weiteren Prozessschritten Notching, Vereinzelung und Stapelbildung führen.

Beim Notching wird die gewünschte Geometrie des Ableiterföhnchens ausgeformt. Ebenso erfolgt das Ausformen zweier Nuten an beiden Beschichtungskanten, zwischen denen der spätere Querschnitt angesetzt wird. Ein Grund hierfür ist die Kollisionsvermeidung der Ecken des Elektrodenblatts mit den tiefgezogenen Gehäuseecken der späteren Batteriezelle. Im Anschluss an das Notching werden die vorgeformten Einzelblätter vereinzelt, sodass Einzelblattelektroden vorliegen. Zur Qualitätssicherung werden im industriellen Umfeld sowohl die Schnittkanten auf eine mechanische oder thermische Deformation als auch die Elektrodenoberflächen auf eine mögliche Partikelkontamination geprüft (Örüm Aydın & Zajonz et al. 2023). Darüber hinaus ist die Maßhaltigkeit der Einzelblattelektroden ein wichtiger Qualitätsparameter. (Weinmann 2022, S. 39) gibt hierzu sowohl für die Breite als auch für die Länge eine Toleranz von $\pm 0,2\text{--}0,3 \text{ mm}$ an. (Ma & Schabel et al. 2023)

Für das Notching sowie auch für das Vereinzeln werden Stanz- und Laserverfahren eingesetzt. So ist das Stanzverfahren in der Batteriezellfertigung etabliert, mit dem sich nach (Weinmann 2022, S. 38) etwa 120 bis 240 Elektrodenblätter pro Minute vereinzeln lassen. Nachteilig ist jedoch der auftretende Verschleiß aufgrund abrasiver Partikel in der Beschichtung, was zu einer variierenden Schnittkantenqualität führt. Zuzüglich kann auch je nach eingestelltem Schneidspalt an den Schnittkanten eine Delamination der Beschichtung vom Substrat auftreten. Demgegenüber steht das Laserverfahren, dass eine gleichbleibende Schnittkantenqualität erzielt, allerdings auch eine Wärmeinflusszone hinterlässt, was sich negativ auf die Zellperformance auswirken kann. Im Hinblick auf die Geschwindigkeit erzielt das Laserverfahren nach (Weinmann 2022, S. 38) meist zwischen $60 \text{ und } 70 \text{ m min}^{-1}$. Zudem verspricht das Laserverfahren eine höhere Flexibilität, wobei je nach Prozess trotzdem auch formatabhängige Maschinenkomponenten benötigt werden. Darüber hinaus erfordert die Laservereinzelnung eine präzise Parametereinstellung. Generell werden beim Zuschnitt der Einzelblätter fertigungsunabhängig Maße mit $\pm 0,2$ bis $\pm 0,3 \text{ mm}$ Toleranz erreicht. (Jansen & Kandula et al. 2020; Weinmann 2022, S. 35–39)

Weiterhin finden sich in der Forschung Ansätze für neue Vereinzelungsverfahren oder zur Optimierung bestehender Verfahren. So entwickeln (Baumeister & Fleischer 2014) beispielsweise ein Verfahren, dass aus einem Elektrodencoil die gewünschte Einzelblattelektrode mittels einer Feinstanze ausstanzt und im selben Hub auf den Stapel ablegt, sodass die beiden Prozesse Vereinzelung und Stapelbildung in eine Anlage integriert werden. (Kriegler & Binzer et al. 2021) entwickeln optimierte Strategien zur Vereinzelung mittels unterschiedlicher Laserverfahren und erreichen mit einem Continuous Wave Faserlaser Schneidgeschwindigkeiten von bis zu 10 m s^{-1} . Bei (Weinmann & Töpper et al. 2020) steht dagegen die Flexibilität der Vereinzelung im Fokus, sodass ein hochflexibles Handhabungselement mit integriertem Vereinzelungsmechanismus entwickelt wird, mit dessen Hilfe formatflexible Einzelblattelektroden gefertigt werden können.

2.2.4 Zellstapelbildung mit Einzelblattelektroden

Entsprechend den in Abbildung 2-9 dargestellten Zellverbänden liegt es nahe, dass je nach gewünschtem Aufbau unterschiedliche Herstellungsverfahren zum Einsatz kommen müssen. Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht das Einzelblattstapeln, weswegen nur die Herstellung von Zellverbänden aus Einzelblattelektroden betrachtet wird. Nach (Weinmann 2022, S. 12) kann die Herstellung von Zellverbänden aus Einzelblattelektroden in sechs verschiedene Arten eingeteilt werden, s. Abbildung 2-9.

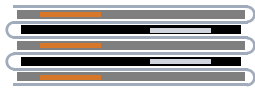
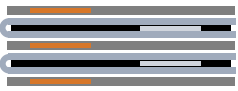
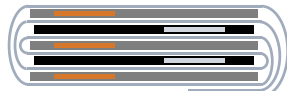
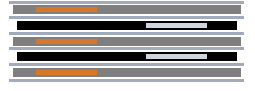
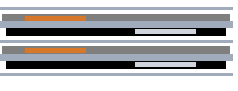
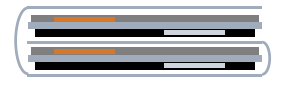
Gestapelter Zellverbund aus losen Einzelblattelektroden	Laminierte Elektroden und gestapelter Zellverbund	Laminierte Elektroden und gewickelter Zellverbund
 <p>Eingelegte Einzelblattelektroden in Z-förmig gefalteten Separator (sog. Z-Falten)</p>	 <p>Stapeln kuvertierter und laminiertes Elektroden</p>	 <p>Einwickeln eines kontinuierlichen Separators mit auflaminierten Einzelblattelektroden</p>
 <p>Stapeln vereinzelter Separatoren und Elektroden <i>Fokus der Arbeit</i></p>	 <p>Stapeln laminiertes Verbände aus Anode-Separator-Kathode</p>	 <p>Einwickeln eines kont. Separators mit auflaminierten Verbänden aus Anode-Separator-Kathode</p>

Abbildung 2-9: Verschiedene Arten von Zellverbänden mit jeweils unterschiedlichen Herstellungsverfahren in Anlehnung an (Weinmann 2022, S. 12)

Bei vier der sechs Zellverbundtypen wird vorab eine Laminierung, d.h. ein thermisches Fügen der Elektroden mit dem Separator, durchgeführt (Leithoff & Fröhlich et al. 2022).

Je nach Prozessführung bei der Lamination lassen sich die Elektroden stapeln oder auch wickeln. Da in der vorliegenden Arbeit laminierte Elektroden jedoch nicht untersucht werden, wird von einer weiteren Ausführung abgesehen und auf (Kaden & Schlüter et al. 2021; Leithoff & Dilger et al. 2021; Leithoff & Fröhlich et al. 2022) verwiesen.

Hinsichtlich der Stapelbildung mit Einzelblattelektroden ohne Laminierung lassen sich zwei Ausprägungen der Prozessführung differenzieren, die sich in der Verarbeitung des Separators unterscheiden. So wird beim sog. Z-Falten der kontinuierliche Separator mit einer Relativbewegung zum Stapeltisch horizontal in Zick-Zack-Bewegungen über den Stapel geführt, sodass die Elektroden in die entstehenden Taschen eingelegt werden können und der Separator erst am Ende geschnitten wird (Kwade & Haselrieder et al. 2018; Schäfer & Weinmann et al. 2020; Schilling & Schmitt et al. 2016). Bei der zweiten Ausprägung, der sog. Einzelblattstapelbildung, werden mittels Pick-and-Place-Handhabungsoperationen iterierend Separator, Anode, Separator, Kathode gestapelt, wobei der Separator wie die Elektroden zuvor blattweise vereinzelt wurde (Baumeister 2017, S. 118; Pettinger & Kampker et al. 2018, S. 216). Die Anoden- und Kathodenblätter werden in Magazinen den Stapelanlagen zugeführt (Weinmann 2022, S. 48), während die Vereinzelnung des Separators beim Einzelblattstapeln oft in die Anlage integriert ist (Baumeister 2017, S. 118; Digatron Systems s.r.l. 2024)⁹. Dadurch ist kein Entnehmen des Separators aus einem Magazin notwendig, was aufgrund einer möglichen elektrostatischen Aufladung des Separators von Vorteil ist (Kurfer & Westermeier et al. 2012). Nach der Entnahme der Elektroden aus dem Magazin werden diese relativ zur Handhabungseinrichtung präzise ausgerichtet, bevor sie dem eigentlichen Stapelprozess zugeführt werden (Schäfer & Weinmann et al. 2020). Sowohl beim Z-Falten als auch beim Einzelblattstapeln wird der sich bildende Stapel mithilfe des Handhabungssystems oder mechanischer Niederhalter durchgängig gegen Verrutschen gesichert (Kurfer & Westermeier et al. 2012; Mayer & Fleischer 2021). In Abbildung 2-10 sind sowohl das Z-Falten in a) als auch das Einzelblattstapeln in b) schematisch dargestellt.

⁹ Digatron Systems s.r.l. (2024), *Sheet Stacking Unit (SSU)*. <https://www.digatronsystems.com/product/laboratory/lithium-ion-machinery/pilot-assembly-equipment-for-pouch-cell-manufacturing/dry-room/sheet-stacking-unit/> [10.03.2024].

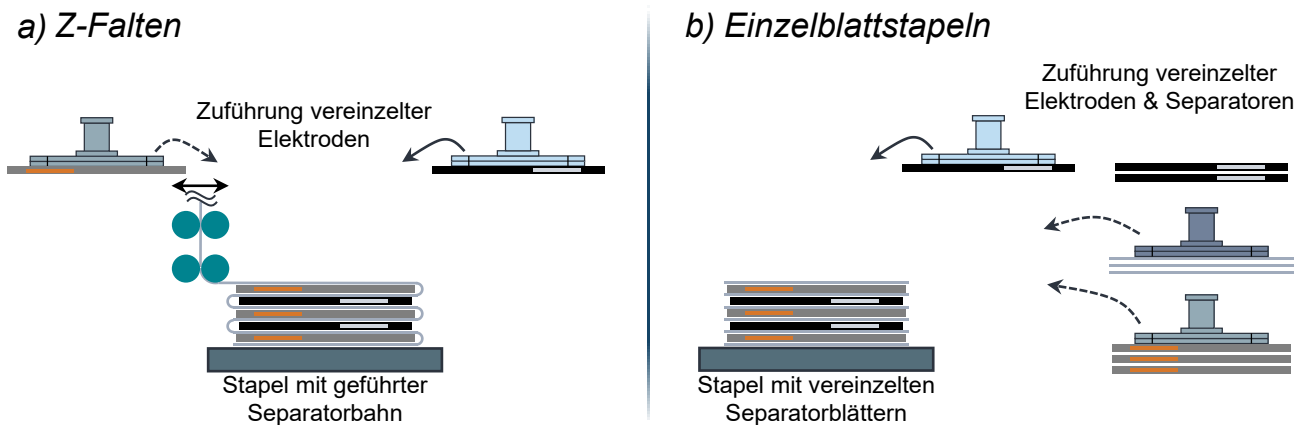


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung des Z-Faltens in a) und das Einzelblattstapeln in b) in Anlehnung an (Schäfer & Weinmann et al. 2020)

Während Z-Falten häufig bei höheren Durchsatzanforderungen verwendet wird, wird das Einzelblattstapeln vor allem bei kleineren Stückzahlen und Laboranwendungen sowie für formatflexible Batteriezellen verwendet (Digatron Systems s.r.l. 2024; Kwade & Haselrieder et al. 2018; Michaelis & Schütrumpf et al. 2023, S. 100; Storz & Schild et al. 2021). Auch für zukünftige Feststoffbatterien ist das Einzelblattstapeln aufgrund der hohen Steifigkeit der Stapelkomponenten die plausibelste Fertigungsmethode (Schnell & Günther et al. 2018).

Darüber hinaus gibt es forschungsseitig weitere Variationen der Stapelbildung mit Einzelblattelektroden. So kombinieren (Baumeister & Fleischer 2014) die Vereinzlung mit der Stapelbildung in einem integrierten Cut-and-place-Verfahren, sodass während der Vereinzlung mittels mechanischer Stanze die Einzelblattelektroden bereits gegriffen und im selben Hub auf den sich darunter befindenden Stapel abgelegt werden. (Weinmann 2022, S. 125) greift die Idee der anlagenseitigen Integration von Vereinzlung und Stapelbildung auf und entwickelt einen formatflexiblen Stapelprozess, wenngleich der eigentliche Stapelprozess nicht näher erläutert wird und der Fokus auf der formatflexiblen Vereinzlung liegt. (Boeselager & Kapelar et al. 2021; Boeselager & Müller et al. 2023) entwickeln einen Highspeed-Stapelprozess, bei dem die Elektrodenblätter in ein rotierendes Flügelrad eingeworfen werden und der Stapel durch gezieltes Auswerfen gebildet wird. (Boeselager & Vogt et al. 2024) weisen die Machbarkeit des Verfahrens nach und schätzen das Potenzial zur Erreichung industriell geforderter Stapelgenauigkeiten bei entsprechenden Maßnahmen als realistisch ein. (Bach 2017, S. 226; Schröder & Glodde et al. 2015) fokussieren sich auf die Weiterentwicklung des Z-Faltens, wobei die diskontinuierlichen Pick-and-Place-Bewegungen beim Einlegen der

Einzelblattelektroden durch eine kontinuierliche Bewegung ersetzt werden, um so den Durchsatz zu steigern.

Im Hinblick auf die industrielle Umsetzung sowohl des Z-Faltens als auch des Einzelblattstapelns finden sich im Kern meist Handhabungsprozesse, Prozesse zum präzisen Ausrichten der Einzelblattelektroden und der eigentliche Stapelprozess wieder, während sich die Anordnung und Umsetzung in den jeweiligen Anlagen nicht zuletzt aufgrund spezifischer Anordnungen unterscheiden. Im Folgenden werden daher mögliche technische Umsetzungen der drei Einzelprozesse vorgestellt. Da in der vorliegenden Arbeit die Einzelblattstapelbildung im Fokus liegt, wird bei der Stapelbildung der entsprechende Prozess detailliert. Die Lösungen für die Handhabungsprozesse und Ausrichtprozesse können häufig sowohl beim Z-Falten als auch beim Einzelblattstapelns verwendet werden.

2.2.4.1 Handhabung von Einzelblattelektroden

Für die Handhabung von Einzelblattelektroden gibt es innerhalb von Stapelanlagen zwei wesentliche Aufgabenbereiche. Zunächst müssen die Elektroden aus dem Magazin vereinzelt und dem Ausrichtprozess zugeführt werden, wo die Elektrode in eine definierte Position überführt wird. Von diesem Prozessschritt wird die ausgerichtete Elektrode mit definierter Position dem eigentlichen Stapelprozess zugeführt.

Zur Entnahme der Einzelblattelektroden aus dem Magazin werden meist punktuelle Vakuum-Sauggreifer verwendet, die den Abschälprozess aus dem Magazin durch ein zeitlich versetztes, punktuell Anheben des Elektrodenblatts unterstützen (Weinmann 2022, S. 49). Nach der Ausrichtung des Elektrodenblatts werden Niederdruckflächengreifer verwendet, um die Elektrode auf dem Stapel abzulegen, wobei die Greifer ein über die Fläche verteiltes Lochmuster besitzen, sodass die mechanische Beanspruchung der Elektrode minimiert wird (Fröhlich & Leithoff et al. 2018). Wesentlich für den Einsatz von Niederdruckflächengreifer ist die im Gegensatz zu den punktuellen Sauggreifern genauere Positionsfixierung der Elektrode am Greifer, sodass diese präziser auf dem Stapel abgelegt werden kann (Weinmann 2022, S. 49). Prozessbedingt können die Niederdruckflächengreifer jedoch nicht vollflächig die Elektrode greifen. Zur Sicherstellung der Position aller Stapelkomponenten muss der Stapel durchgängig fixiert werden. Der Niederdruckflächengreifer übernimmt diese Funktion kurz bei der Ablage einer weiteren Stapellage, in der dazwischenliegenden Zeit muss der Stapel jedoch über zusätzliche Niederhalter fixiert werden. Diese Niederhalter dürfen nicht mit

dem Greifer kollidieren, sodass der Greifer an den Stellen ausgespart ist, an denen die Niederhalter den Stapel fixieren. Hierauf wird auch in Kapitel 2.2.4.3 detailliert eingegangen. In Abbildung 2-11 findet sich eine Visualisierung der Elektroden mit den Greifflächen der typischerweise verwendeten Greifer.

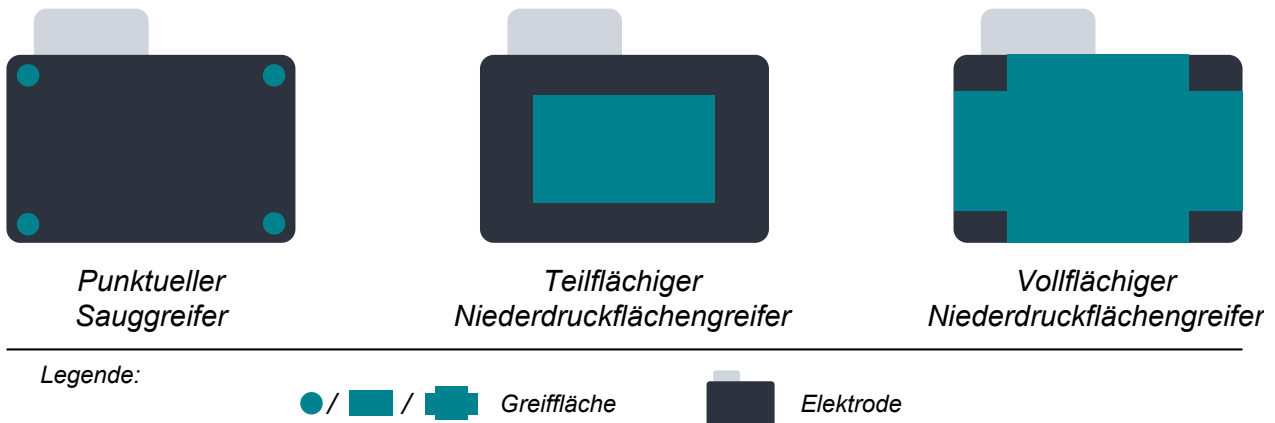


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Greifflächen durch unterschiedliche Greifertypen in Stapelanlagen nach (Weinmann 2022, S. 50)

Forschungsseitig werden auch Vakuumgreifer untersucht, die die Elektrodenblätter durch eine rotative Bewegung vom Magazin entnehmen, sodass der Durchsatz durch Vermeidung von Pick-and-Place-Bewegungen mit den prinzipbedingt wiederkehrenden Beschleunigungen der Kinematik maximiert werden kann (Müller & Aydemir et al. 2021; Schröder & Glodde et al. 2016).

In der Literatur werden darüber hinaus auch Bernoulligreifer für die Handhabung von Elektroden entwickelt und charakterisiert, die zwar durch die kontaktlose Handhabung vorteilhaft erscheinen, allerdings zu einer höheren Partikelbelastung der Umgebung führen und daher nachteilig sind (Fröhlich & Leithoff et al. 2018; Stühm & Tornow et al. 2014).

2.2.4.2 Ausrichten von Einzelblattelektroden

Nach der Entnahme der Elektroden aus dem Magazin müssen diese exakt ausgerichtet werden. Die Ausrichtung kann mittels mechanischem Anschlag, über die Ermittlung der Position durch eine Kamera und anschließender Ausrichtung über Positionierachsen oder auch über Vibrationsbewegungen erfolgen (Bauer & Glock 2016; Hirai & Yamaura 2013; Miyazaki & Yamaura 2013).

Bei der mechanischen Ausrichtung werden die Elektroden auf einen Ausrichttisch abgelegt und durch Schieber in die entsprechende Position geschoben, sodass der Greifer die Elektrode von dort präzise aufnehmen kann (Yoshihiro & Noriyuki et al. 2003). Je nach Prozessführung können ein oder zwei Schieber als Festanschlag dienen oder auch alle vier Schieber beweglich ausgeführt werden, s. Abbildung 2-12 links.

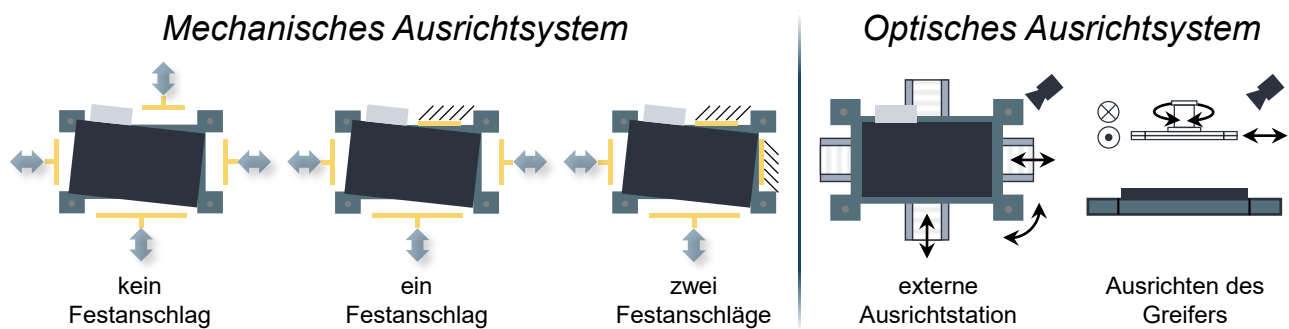


Abbildung 2-12: Exemplarische Darstellung verwendeter Systeme zur Ausrichtung von Elektroden in Stapelanlagen nach (Weinmann 2022, S. 52)

Bei der optischen Ausrichtung erfolgt ebenfalls die Ablage der Elektrode auf einen Ausrichttisch, wobei die Position des Elektrodenblatts mithilfe der Kamera ermittelt wird. Darauf basierend werden Korrekturwerte für die Bewegungsachsen abgeleitet und entweder die Elektrode oder der Greifer so positioniert, dass die Elektrode in der gewünschten Position aufgenommen werden kann. Eine Berührung der Elektrode durch seitliche Schieber erfolgt hierbei nicht. (Hirai & Yamaura 2013; Miyazaki & Yamaura 2013; Weinmann 2022, S. 52)

Unabhängig von der Ausrichtungsart erfolgen während des Ausrichtprozesses häufig diverse Qualitätsprüfungen, beispielsweise Partikeldetektion, Elektrodenblattabmaße oder Doppellagenerkennung (Fröhlich & Leithoff et al. 2018; Weinmann 2022, S. 52–53).

Je nach Maschinenprinzip kann die Ausrichtung der Elektroden bzw. des gesamten Stapels auch anders erfolgen. So beschreiben (Bauer & Glock 2016) ein Verfahren zur Ausrichtung des Stapels mittels Rüttel- oder Vibrationsbewegungen, die die einzelnen Komponenten des Stapels gegen stabförmig geformte, mit Sägezähnen profilierte Anschläge bewegen. Entgegen der Ausrichtung von einzelnen Elektroden wird hierbei der gesamte, bereits gestapelte Elektroden-Separator-Verbund ausgerichtet. Ein ähnliches Prinzip unter Nutzung von Rüttelbewegungen und geeigneten Anschlägen wird in (Bi-

beracher & Stolz et al. 2021) beschrieben. Hinsichtlich der Positionierung mittels Vibrations- oder Rüttelbewegungen ist jedoch zu vermerken, dass diese als randständige Prinzipien betrachtet werden können, da sie nicht oder nur bedingt kompatibel mit den gängigen Stapelverfahren der Einzelblattstapelbildung sowie des Z-Faltens sind.

2.2.4.3 Stapelbildung und Stapelgenauigkeit

Zur Stapelbildung werden die vereinzelt Elektroden- und Separatorblätter meist mittels Niederdruckflächengreifer dem Stapeltisch zugeführt. Dieser besteht aus einem Tisch mit Niederhaltern, die den Stapel gegen das Verrutschen fixieren und mittels pneumatischem oder elektrischem Antrieb aktuiert werden (Weinmann 2022, S. 53).

Prozessseitig fixieren meist vier Niederhalter den im Bau befindlichen Stapel. Der Greifer legt die gegriffene Elektrode oder den Separator auf dem Stapel ab, wobei durch deren Biegeschlaffheit die Bereiche nach oben gebogen werden, worunter sich die Niederhalter befinden. Dies ist auch der Grund, warum die Greifer an diesen Stellen Aussparungen besitzen oder kleiner als die Elektrodenfläche ausgeführt werden. Nach der Ablage drückt der Greifer auf den Stapel, wodurch dieser fixiert wird, sodass die Niederhalter in einer Art Kreisbewegung nach außen und dann wieder nach innen bewegt werden können. Durch diese Bewegung werden sowohl die abgelegte Elektrode oder der Separator als auch der darunterliegende Stapel durch die Niederhalter fixiert, sodass der Greifer gelöst und die nächste Komponente auf dem Stapel abgelegt werden kann. Dieser Ablauf wird solange iteriert, bis die gewünschte Stapelhöhe erreicht ist. Durch diese Prozessführung kann sichergestellt werden, dass der Stapel zu jeder Zeit gegen das Verrutschen fixiert ist. Nach Abschluss der Zellstapelbildung wird der Stapel mit Klebebändern fixiert, sodass er in der weiteren Prozessierung gegen das Verrutschen gesichert ist. (Baumeister 2017, S. 114–116; Techel & Lütke et al. 2011, S. 38–39; Weinmann 2022, S. 45–53)

Als wichtiger Qualitätsparameter des Elektroden-Separator-Verbunds ist prozessseitig die resultierende Stapelgenauigkeit zu sehen (Heimes & Dorn et al. 2024, S. 262; Leit-hoff & Fröhlich et al. 2020). Bei genauerer Betrachtung wird der Begriff nach (Weinmann 2022, S. 43–44) jedoch in unterschiedlicher Art und Weise verwendet. So kann die Stapelgenauigkeit nach der Lage der Einzelkomponenten des Stapels beschrieben werden, wo sowohl zueinander angrenzende, artgleiche Komponenten („adjacent“) als auch die gesamten artgleichen Komponenten („overall“) miteinander verglichen werden. Ebenso kann die Stapelgenauigkeit im Zellverbund betrachtet werden. Sowohl im

Zellverbund als auch bei der Betrachtung der Einzelkomponenten können sowohl die Außenkanten als auch die Mittelpunkte als Bemaßungsreferenz verwendet werden. In Abbildung 2-13 findet sich eine entsprechende Visualisierung. (Weinmann 2022, S. 43–44)

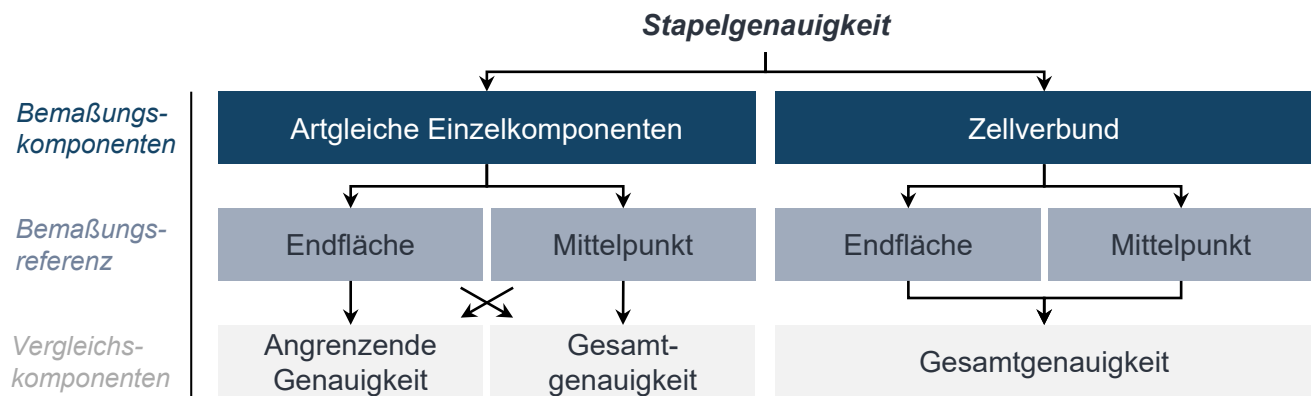


Abbildung 2-13: Unterschiedliche Verwendungsarten des Begriffs „Stapelgenauigkeit“ bei der Stapelbildung nach (Weinmann 2022, S. 44)

In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zur geforderten Stapelgenauigkeit, die sich im Bereich von $\pm 0,1$ mm bis $\pm 0,5$ mm bewegen, wobei meist keine Angaben gemacht werden, welche Definition der Stapelgenauigkeit verwendet wird (Kollenda & Hussein et al. 2023; Mooy 2019, S. 52; Schröder & Aydemir et al. 2016; Weinmann 2022, S. 47).

(Kollenda & Hussein et al. 2023) betrachten die Abmaße der Einzelblattelektroden als wichtigen Einflussfaktor auf die Stapelgenauigkeit. (Weinmann 2022, S. 102–116) ergänzt als weitere Einflussfaktoren die geometrischen Defekte des Einzelblatts bedingt durch die Kalandrierung und Vereinzelung. In beiden Fällen werden die Einflussfaktoren meist nur auszugsweise untersucht, um qualitative Aussagen zu treffen, eine systematische Quantifizierung findet nur bedingt statt.

Eine weitere notwendige Eigenschaft des Stapels ist die Schädigungsfreiheit der Einzelkomponenten, was insbesondere auch bei der Interaktion der Niederhalter mit dem Stapel berücksichtigt werden muss. So muss bei der Einstellung der Niederhalterkraft ein Kompromiss zwischen ausreichender Fixierung und Vermeidung von Beschädigung der Komponenten gefunden werden (Techel & Lütke et al. 2011, S. 40). Gleichzeitig werden die Niederhalter bevorzugt mit abgerundeten Kanten und großen Eckenradien ausgeführt und teilweise sogar mit Kunststoff ummantelt, um das Risiko einer Beschädigung zu minimieren (Techel & Lütke et al. 2011, S. 40–41; Weinmann 2022, S. 53).

Zuzüglich zur Schädigungsfreiheit der Einzelkomponenten muss die Partikelkontamination des Stapels vermieden werden, da diese zu internen Kurzschlüssen führen können, was wiederum zum thermischen Durchgehen der Zelle, dem sog. „Thermal Runaway“, führen kann (Grabow & Klink et al. 2023).

2.3 Modellierungsansätze in der Batteriezellfertigung

Durch die hohen Materialkosten, die vielen Prozess(sub-)schritte und deren Komplexität in der Prozessführung sowie die notwendigen Umgebungsbedingungen gibt es große Bestrebungen zur Entwicklung performanter Simulationsmodelle, die den experimentellen Aufwand reduzieren können. Im Hinblick auf die Prozesskette der Batteriezellfertigung kann nach (Schönemann 2017, S. 67) die Simulation in die drei Ebenen Produkt, Prozess und Maschine aufgeteilt werden, die jeweils entsprechende Modelle beinhalten und miteinander verknüpft sind. Hierzu wird in Kapitel 2.3.1 zunächst auf produktseitige Ansätze zur Modellierung der Batteriezellkomponenten eingegangen. Da sich Maschinen- und Prozessmodelle häufig vermischen, werden diese in Kapitel 2.3.2 dargestellt, wobei der Fokus aufgrund der Ausrichtung der Arbeit auf die Prozessmodelle gelegt wird.

2.3.1 Ansätze zur mechanischen Produktmodellierung

Modelle der Batteriezelle bzw. deren Komponenten werden mit unterschiedlichen Zielsetzungen entwickelt, wie die Abbildung des elektrischen, des elektrochemischen, des thermischen oder des mechanischen Verhaltens (Kermani & Sahraei 2017; Miranda & Gonçalves et al. 2023; Tamilselvi & Gunasundari et al. 2021). Methodisch kann beispielsweise mittels datengetriebener, numerischer oder analytischer Modellansätze gearbeitet werden, wobei auch Mischformen angewendet werden (Tamilselvi & Gunasundari et al. 2021; Zhu & Wierzbicki et al. 2018). Da für die vorliegende Arbeit lediglich das mechanische Verhalten der Elektroden und dessen Modellierung mittels Finiter Elemente (FE) relevant ist, werden in Kapitel 2.3.1.1 mechanische FE-Modellansätze diskutiert und in Kapitel 2.3.1.2 experimentelle Charakterisierungsmethoden für Elektroden zur Parametrisierung der FE-Modelle beschrieben.

2.3.1.1 FE-Modellansätze für Batteriezellstapel und Batterieelektroden

Mechanische Modellierungs- und Simulationsansätze können je nach Zielstellung von der Mikroskala im (Sub-)Mikrometer-Bereich über die Meso- und Makroskala bis zur Systemebene im Meter-Bereich angewendet werden, s. Abbildung 2-14 (Zhu & Wierzbicki et al. 2018).

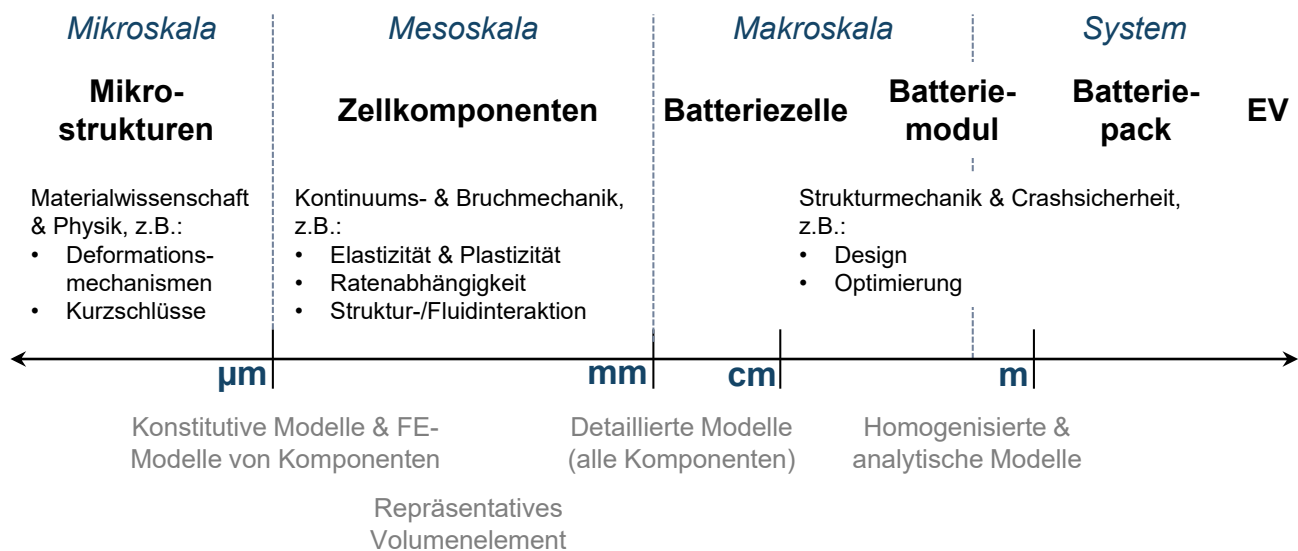


Abbildung 2-14: Größenskalen und Disziplinen zur Untersuchung mechanischer Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien und Modelle zur mechanischen Charakterisierung nach (Zhu & Wierzbicki et al. 2018)

So werden mittels FE auf Mikroskalenebene beispielsweise Interkalationsvorgänge von Lithium in NMC-Kathoden und die dadurch induzierten Spannungen simuliert, wobei NMC-Strukturen in der Größe von $55 \mu\text{m} \times 33 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ betrachtet werden (Wu & Xiao et al. 2016). Auf der Mesoskalenebene werden Komponenten der Zelle, beispielsweise der Separator oder die Elektroden und deren Metallfolien, über konstitutive Materialmodelle abgebildet (Bonatti & Mohr 2016; Zhang & Xu et al. 2017; Zhu & Wierzbicki et al. 2018). Dem folgend werden auf Makroskalenebene bereits ganze Batteriezellen abgebildet, wobei eine häufige Motivation die Sicherheit der Batteriezelle im Crashfall darstellt, s. beispielsweise (Kulkarni & Vysoudil et al. 2021; Sahraei & Hill et al. 2012; Spielbauer & Peteler et al. 2023). Über das Batteriemodul bis zum Batteriepack und dem Gesamtsystem, beispielsweise dem elektrischen Fahrzeug, werden FE-Simulationen auf Systemebene ausgeführt, wobei die detaillierte Modellierung der einzelnen Zellkomponenten eine immer geringere Rolle spielt (Berzi & Baldanzini et al. 2018; Pan & Xiong et al. 2022). Für die vorliegende Arbeit ist insbesondere die FE-Modellierung der Kathoden in der Flächengrößenordnung von etwa $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ relevant, was

in die Mesoskalenebene mit Überlapp zur Makroskalenebene einzuordnen ist. Aus diesem Grund wird sich im Folgenden auf diese FE-Modellansätze fokussiert.

Bei der Modellierung von Kathoden lassen sich nach (Kermani & Sahraei 2017) die in der Literatur verwendeten konstitutiven Modelle hinsichtlich verschiedener Eigenschaften kategorisieren. So ist zunächst der Materialmodelltyp zu unterscheiden, der sich in kompressible Schaummaterialien und inkompressible Materialien mit modellierter Plastizität gliedert. Darüber hinaus werden je nach Modell Zug- und/oder Druckeigenschaften sowie isotrope oder anisotrope Eigenschaften implementiert. Ergänzend werden Modelle mit und ohne Dehnratenabhängigkeit verwendet. (Kermani & Sahraei 2017)

Die Überführung der konstitutiven Modelle in ein FE-Modell und die damit einhergehende Diskretisierung wird mittels Schalen-, Volumen- oder Balkenelementen umgesetzt, wobei die einzelnen Bestandteile der Batteriezelle je nach Modell als eigenes Bauteil modelliert oder aber auch mehrere Bestandteile als homogener Verbund zusammengefasst werden. Nicht zuletzt entscheidet die Zielsetzung der Modellierung zusätzlich über das zu modellierende Versagensverhalten, das beispielsweise spannungs- oder dehnungsbasiert umgesetzt werden kann. (Kermani & Sahraei 2017)

(Aydemir 2021, S. 82–83) modelliert einen Zugversuch einer doppelseitig beschichteten Kathode und homogenisiert hierfür den Aktivmaterial-Aluminiumfolienverbund als eine Schalenelementschicht und geht von einem inkompressiblen, isotropen elastisch-plastischen und dehnratenunabhängigen Materialverhalten aus. Ein Versagenskriterium wird nicht implementiert. Auch (Müller & Aydemir et al. 2021) scheinen einen ähnlichen Ansatz zur Simulation des Elektrodenverhaltens zu verwenden, wobei hier weniger Modelldetails aufgeführt werden, sodass keine definitive Aussage möglich ist.

(Gupta & Üçel et al. 2020) modellieren einen U-Biegeversuch mit einer einseitig beschichteten NMC-Kathode und verwenden hierfür ebenfalls Schalenelemente, modellieren aber die Aluminiumfolie und das Aktivmaterial jeweils als eigene Schicht. Hinsichtlich des Materialverhaltens werden sowohl elastische als auch elastisch-ideal-plastische Materialeigenschaften implementiert.

(Sahraei & Hill et al. 2012) modellieren verschiedene Belastungsarten auf den gesamten Zellstapel mit und ohne Pouchverpackung und verwenden sowohl Volumen- als auch Schalenelemente zur Diskretisierung, wobei die Volumenelemente für das Aktivmaterial verwendet werden. Das Aktivmaterial wird mittels eines im Simulationspro-

gramm LS-DYNA implementierten Crushable Foam Materialmodells MAT_063 abgebildet, mithilfe dessen die Kompressibilität der Aktivmaterialschicht dargestellt werden kann (Ansys, Inc. 2024)¹⁰. In der Literatur zeigt sich, dass Crushable Foam Materialmodelle häufig für das Kompressionsverhalten der Aktivmaterialien verwendet werden. So verwenden beispielsweise auch (Ahn 2024), (Zhang & Santhanagopalan et al. 2015b) und (Spielbauer & Peteler et al. 2023) diese Art von Materialmodell zur Simulation des Aktivmaterialverhaltens.

(Li & Xing et al. 2022) simulieren eine prismatische Zelle unter Biegebelastung bei einem Drei-Punkt-Biegeversuch zur Abbildung des mechanischen Schädigungsverhalten und der Auswirkung auf interne Kurzschlüsse unter Biegebelastungen. Jede Komponente des gewickelten Zellstapels wird modelliert, wobei für die Metallfolien ein isotropes elastisch-plastisches Materialmodell gewählt und deren Verfestigungskurve über das Voce-Gesetz angenähert wird. Das Aktivmaterial und der Separator werden mit einem nicht-linearen porösen Elastizitätsmodell modelliert, das mithilfe lateraler und uniaxialer Kompressionsversuche von zylindrischen Beschichtungsproben kalibriert wird.

(Zhu & Li et al. 2019) stellen eine weitere Möglichkeit zur Modellierung des Aktivmaterials vor und beschreiben dessen Verhalten mit einem Drucker-Prager/Cap-Plastizitätsmodell, das mittels axialen und lateralen Kompressionsversuchen sowie einem Druckversuch mit geschlossener Matrizie charakterisiert wird.

(Zhang & Santhanagopalan et al. 2015a) entwickeln einen Ansatz, bei dem alle gleichen Bestandteile des Stapels jeweils zu einer Schicht im Stapel zusammengefasst werden, mit dem Ziel, ein repräsentatives Verhalten des Zellstapels für einen Indentationstest zu erhalten. Das Aktivmaterial wird hierbei mit einem isotropen nicht-linearen elastisch-plastischen Materialverhalten sowie unterschiedlichen Zug- und Druckeigenschaften modelliert und mittels Volumenelementen diskretisiert. (Zhang & Santhanagopalan et al. 2015b) arbeiten einen ähnlichen Ansatz aus, wobei hierbei das repräsentative Element nicht den ganzen Stapel umfasst, sondern eine Einheit aus Separator-Anode-Separator-Kathode darstellt. (Ali & Lai et al. 2013) verfeinern die Auflösung und modellieren Kathode und Anode jeweils als eine Schicht aus Volumenelementen sowie den Separator als Schalenelementschicht. Aufbauend auf (Zhang & Santhanagopalan

¹⁰ Ansys, Inc. (2024), *Material selector for LS-DYNA*. <https://lsdyna.ansys.com/dynamat/> [29.03.2024].

et al. 2015b) arbeiten (Zhang & Xu et al. 2017) ein Schädigungsmodell für Elektroden aus, mithilfe derer das Versagen unter Kompression simuliert werden kann. Als Schädigungskriterium wird ein dehnungsbasiertes Versagensverhalten des Aktivmaterials verwendet, welches aus einer Druckspannungs-Dehnungs-Kurve einer Anode abgeleitet wird.

Es gibt in der Literatur weitere FE-Simulationsansätze von Batteriezellen und deren Komponenten, die hinsichtlich der Modellierung der Elektroden jedoch meist ähnliche Ansätze wie die bereits beschriebenen verfolgen, s. beispielsweise (Lai & Ali et al. 2014; Lee & Kim 2020; Wang & Yang et al. 2016). Alle Modellansätze haben jedoch gemein, dass sie die Realität nur hinreichend genau abbilden können, wenn das Modell mit den richtigen Parameterwerten parametrisiert wird. Hierzu gibt es in der Literatur unterschiedliche Methoden, auf die in Kapitel 2.3.1.2 eingegangen wird.

2.3.1.2 Mechanische Charakterisierung von Batteriezellkomponenten

Je nach Modellansatz werden unterschiedliche Parameter der Batteriezelle und deren Komponenten benötigt. Eine in der Literatur häufig verwendete Art der mechanischen Charakterisierung von Batteriezellkomponenten sind Zug- und Druckversuche an Elektroden.

So ermittelt (Haselrieder 2017, S. 164–165) durch Zugversuche den E-Modul der gesamten Elektrode E_K , sowie deren Reißfestigkeit und -dehnung. Es zeigt sich, dass der E-Modul der Elektroden im unkalandrierten Zustand aufgrund der stochastischen Strukturausbildung im Beschichtungs- und Trocknungsprozess stärker schwankt als nach der Kalandrierung, was auf den homogenisierenden Einfluss des Prozesses zurückgeführt werden kann. Darüber hinaus zeigt sich, dass sich die Beschichtung und das Substrat einheitlich durch die Zugbeanspruchung dehnen, sodass das Verhalten des Elektrodenverbands als Komposit charakterisiert werden kann.

(Zheng & Tan et al. 2012) führen ebenfalls Zugversuche an NMC111 durch und zeigen, dass der E-Modul der Kathoden bei sinkender Porosität der Beschichtung steigt. Die sinkende Porosität entspricht dabei einer steigenden Linienlast bei der Kalandrierung.

(Zhang & Xu et al. 2017) verwenden sowohl Zug- als auch Druckversuche zur Kalibrierung eines Simulationsmodells, wobei die experimentelle Zugkurve durch ein isotropes linear-verfestigendes elastisch-plastisches Materialmodell angenähert wird, welches in

Formel 2-3 dargestellt ist. σ_z ist die Zugspannung, ε die Dehnung, E der E-Modul, σ^y die Fließspannung und E_t der tangentielle E-Modul.

$$\sigma_z = \begin{cases} E\varepsilon, & \text{bei } \sigma < \sigma^y \\ \sigma^y + E_t \left(\varepsilon - \frac{\sigma^y}{E} \right), & \text{bei } \sigma \geq \sigma^y \end{cases} \quad \text{Formel 2-3}$$

Es zeigt sich, dass hinsichtlich des Schädigungsverhaltens bei Zugversuchen das Substrat früher reißt als das Aktivmaterial, was auf den polymeren Binder zurückgeführt wird. Ebenfalls wird beschrieben, dass das Substrat durch die Kalandrierung beschädigt wird, was zu einem früheren Versagen des beschichteten Substrats im Vergleich zu einem baugleichen, jedoch unbeschichteten Substrat führt. Es wird angenommen, dass die Zugbelastung hauptsächlich durch das Substrat aufgenommen wird, woraus Formel 2-4 abgeleitet wird. $F_{Z,K}$ ist dabei die gesamte Zugkraft an der Elektrode, $F_{Z,Al}$ bzw. $F_{Z,B}$ die jeweilige Kraft auf Substrat bzw. Beschichtung, wobei α den Anteil der Beschichtung am Zugwiderstand darstellt. (Zhang & Xu et al. 2017)

$$F_{Z,K} = \alpha F_{Z,B} + (1 - \alpha) F_{Z,Al} \quad \text{Formel 2-4}$$

Das untersuchte Druckspannungs-Stauchungsverhalten zeigt zunächst eine geringe Steigung der Spannung über die Stauchung, die dann jedoch weiter anwächst, bis die Spannung abrupt abfällt. Das Verhalten kann über die Verdichtung der Poren und der weiteren Kompression der Schicht mit dem schlussendlichen Versagen des Aktivmaterials begründet werden. Mathematisch modellieren (Zhang & Xu et al. 2017) das Kompressionsverhalten entsprechend Formel 2-5, wobei σ_c die Druckspannung, ε die Stauchung, ε_p und E_{max} die Stauchung bzw. der E-Modul des vollständig verdichteten Materials und β ein Fittingparameter darstellen. (Zhang & Xu et al. 2017)

$$\sigma_c = \begin{cases} \frac{E_{max}(e^{\beta\varepsilon} - 1)}{\beta e^{\beta\varepsilon_p}}, & \varepsilon < \varepsilon_p \\ \frac{E_{max}(1 - e^{-\beta\varepsilon})}{\beta} + E_{max}(\varepsilon - \varepsilon_p), & \varepsilon \geq \varepsilon_p \end{cases} \quad \text{Formel 2-5}$$

(Pan & Sedlatschek et al. 2020) verwenden Zugversuche, um das mechanische Verhalten der Elektroden in Abhängigkeit des Ladezustands sowie der Luftexposition zu untersuchen. Es zeigt sich, dass sich das Zugverhalten der Anoden mit dem Ladezustand und der Luftexposition ändert, während bei den untersuchten LFP-Kathoden kein

Einfluss zu erkennen ist. Ein Rückschluss auf weitere Kathodenmaterialsysteme, beispielsweise NMC, kann allerdings nicht gezogen werden.

Darüber hinaus finden sich mechanische Charakterisierungen von Elektroden oder auch ganzen Batteriezellstapeln mittels Zug- und/oder Druckversuchen auch beispielsweise in (Aydemir 2021, S. 74–81; Müller & Aydemir et al. 2021; Muresanu & Dudescu 2022; Sahraei & Bosco et al. 2016; Sypeck & Zhu et al. 2023). Es kann somit festgehalten werden, dass Zug- und Druckversuche eine etablierte Art der mechanischen Charakterisierung von Elektroden darstellen. Während das Substrat leicht auch ohne Beschichtung mechanisch charakterisiert werden kann, s. beispielsweise (Zhang & Zhao et al. 2023), ist die mechanische Charakterisierung der Beschichtung aufgrund der festen Verbindung mit dem Substrat deutlich aufwändiger. Neben dem rechnerischen Rückschluss auf die Eigenschaften wie bei (Zhang & Xu et al. 2017), gibt es in der Literatur hierfür auch experimentelle Methoden.

(Gupta & Üçel et al. 2020) entwickeln ein Verfahren zur Ermittlung der Biegesteifigkeit einseitig beschichteter Elektroden, woraus auf Basis der linear-elastischen Balkentheorie der E-Modul der Beschichtung berechnet werden kann. Die Elektroden werden in einem U-Biegeversuch eingespannt, woraus die Biegekraft und Krümmung der Elektrode ermittelt wird, was als Grundlage für die weitere Berechnung dient.

(Schilling & Schmitt et al. 2016) entwickeln einen Versuchsstand zur Ermittlung der kritischen Biegeradien von Elektroden, die im Rolle-zu-Rolle-Produktionsprozess von Elektroden zwangsläufig auftreten, mit dem Ziel, Prozessparameter ableiten zu können. Die Elektroden werden über unterschiedliche, definierte Radien gebogen und optisch untersucht sowie die Rauheit der Beschichtung an der Biegestelle ermittelt. Als Biegeradien werden 0,1 mm, 0,3 mm, 0,7 mm und 1,0 mm untersucht, wofür Proben aus Lithiummanganoxid-Kathoden (LMO) mit den Verdichtungsgraden 15,2 %, 25,0 %, 34,2 % sowie unkalandrierte Proben verwendet werden. Als Ergebnis wird ein minimaler Radius von 0,7 mm und eine maximale Zugkraft von 45 N identifiziert.

(Klemens & Wurba et al. 2023) ermitteln die Biegesteifigkeit verschiedener einseitig beschichteter Elektroden über eine 2-Punkt-Biegevorrichtung. Die Elektrodenproben werden an einer Seite in einer rotierbaren Einspannung eingespannt, während das andere Ende der Elektrode sich frei bewegen kann und horizontal an einem Kraftsensor anliegt. Durch die Rotation der Einspannung drückt die Elektrode gegen den Sensor,

sodass die resultierende Biegekraft gemessen und die Biegesteifigkeit berechnet werden kann. Es zeigt sich, dass eine höhere Massenbeladung der Elektrode zu einer höheren Biegesteifigkeit führt. Zudem wird gezeigt, dass die Biegesteifigkeit bei zunehmender Flächenkapazität, was den Autoren nach eine höhere Massenbeladung sowie eine größere Dicke der Schicht bedeutet, exponentiell zunimmt.

Eine weitere Möglichkeit, die Beschichtung der Elektroden zu charakterisieren, ist die Nanoindentationstechnik, mittels derer der E-Modul und die Härte von dünnen Beschichtungen ermittelt werden können (Oliver & Pharr 2004). Beispiele hierzu finden sich in (Cheng & Hong et al. 2017; Sangrós Giménez & Finke et al. 2018; Zhu & Zhang et al. 2018). Ebenso gibt es Ansätze, das Beschichtungsmaterial ohne Substrat zu charakterisieren. (Weinmann 2022, S. 84–89) fertigt aus dem Beschichtungsmaterial Zugproben und untersucht diese in Zugversuchen, während (Li & Xing et al. 2022) Kompressionsversuche an zylindrischen Beschichtungsproben durchführen. Diese Verfahren sind allerdings für die vorliegende Arbeit nicht relevant, weswegen sie nicht weiter detailliert werden.

2.3.2 Ansätze zur Prozessmodellierung

Zur Untersuchung, Bewertung und Optimierung verschiedener Aspekte der Stapelbildung existieren in der Literatur bereits einige Modellierungsansätze, die im Folgenden dargestellt werden.

(Husseini & Schmidgruber et al. 2022) simulieren die auftretende Bahnzugspannung in der flexiblen Vereinzelungs- und Stapelbildungsanlage „Coil2Stack“ mithilfe eines kinematischen Prozessmodells und dessen Ergänzung um das physikalische Verhalten der Elektrodenbahn. Das Modell wird in der Softwareumgebung SIMIT und Simcenter AMESIM der SIEMENS AG entwickelt, um eine verbesserte Inbetriebnahme der Anlage zu erzielen. In (Husseini & Schmidgruber et al. 2023) beschreiben die Autoren einen darauf aufbauenden Ansatz, um die Bahnzugspannung der Anlage modellbasiert zu regeln. In (Husseini & Boschert et al. 2024) werden maschinenseitige Einflüsse auf den Z-Stapelprozess modellbasiert untersucht, wobei ebenso die Softwareumgebung Simcenter AMESIM verwendet wird. Es werden zwei verschiedene Arten von Separatoren mit unterschiedlichen Reibkoeffizienten und E-Modulen sowie die Bahngeschwindigkeit des Separators auf den sich im Z-Falter einstellenden Bahnzug untersucht. Es zeigt sich, dass der Bahnzug mit zunehmender Bahngeschwindigkeit steigt. (Kollenda

& Husseini et al. 2023) verwenden ein ähnliches Modell und simulieren die Bahnzugspannung, die Abmaße der vereinzelt Elektrodenblätter sowie die Stapelgenauigkeit. Es zeigt sich, dass die Abmaße der vereinzelt Elektrodenblätter abhängig vom Bahnzug der Anlage sind. (Weinmann & Lang et al. 2018) kommen auf Basis experimenteller Untersuchungen zum gleichen Schluss. Zur Bewertung der Stapelgenauigkeit wird die Position der Elektrodenablage auf den Stapeltisch verwendet. Eine Quantifizierung der Elektrodenabmaße sowie der Stapelgenauigkeit wird nicht durchgeführt, sondern die gemessenen Werte mit der sich einstellenden Standardabweichung dargestellt, die sich im Bereich von etwa 0,2 mm befindet.

(Müller & Aydemir et al. 2021) und (Aydemir 2021, S. 88–138) betrachten den Zuführ- und Faltprozess des Separators beim Z-Falten sowie den Einfluss aufgeklebter Elektroden auf den Separator und der damit verbundenen Faltenbildung. Hierfür wird ein FE-Simulationsmodell in der Softwareumgebung ABAQUS aufgebaut. Der Separator wird auf Basis der Untersuchung uniaxialer Zugversuche mit orthotrop elastisch-plastischem Materialverhalten modelliert und mit S4R-Schalenelementen diskretisiert, während das Kathodenmaterialverhalten mit einem isotropen elastisch-plastischen Materialmodell abgebildet wird.

(Boeselager & Kapelar et al. 2021) entwickeln eine dynamische Mehrkörpersimulation in der Softwareumgebung ADAMS für den eigens entwickelten rotativen Hochdurchsatzstapelprozess (s. Beschreibung in Kapitel 2.2.4). Während die anlagenseitigen Komponenten als Starrkörper integriert werden, wird die Elektrode als verformbarer Körper modelliert, sodass sowohl kinematische Effekte als auch Verformungen der Elektrode simuliert werden können. Ziel der Simulation ist die Untersuchung der Elektrodenbewegung, der dabei auftretenden Kräfte sowie die Positionierung der Elektrode beim Einwurf in das rotierende Flügelrad. (Boeselager & Müller et al. 2023) nutzen die Simulation zur Optimierung der Geometrie des rotierenden Flügelrads. Darüber hinaus erweitern sie die Untersuchung des Prozesses durch eine nicht-lineare, dynamische FE-Simulation mit dem Ziel, die Kontaktkräfte der Elektrode mit dem Flügelrad zu simulieren, um so einen Rückschluss über die Geometrie der Anlagenkomponenten und die damit verbundenen Prozesslimitationen ziehen zu können.

(Müller & Aydemir et al. 2021) simulieren den Entnahmeprozess einer Elektrode aus einem Magazin durch einen rotativen Greifer mithilfe eines gekoppelten FE- und Computational Fluid Dynamics (CFD)-Modells. Das Modell bildet Verformungen und Spann-

gen in der Elektrode ab, wobei isotropes Materialverhalten angenommen wird und Materialparameter mithilfe uniaxialer Zugversuche ermittelt werden. (Mooy 2019, S. 109–111) bewertet für den gleichen rotativen Greifer mithilfe einer FE-Simulation die Saugensätze für den Greifer. (Boeselager & Müller et al. 2023) nutzen das Modell, um den Entnahmeprozess aus dem Magazin hinsichtlich Zykluszeit und beschädigungsfreier Handhabung zu optimieren. Das Ziel dabei ist es, mithilfe des Modells Systemlösungen zu bewerten, die eine Entnahmezeit des Elektrodenblatts von $\leq 0,2$ s realisieren.

(Schmitt & Raatz 2014) entwickeln einen Algorithmus, mithilfe dessen die prozentuale Überlappung der Stapelkomponenten basierend auf der Anzahl der Stapellagen, den Längen und Breiten der Elektroden sowie einer gegebenen Verteilung der translatorischen und rotatorischen Positionierabweichungen berechnet werden kann. Simulationsläufe mit 30 Lagen, Seitenlängen zwischen 50 mm und 300 mm sowie Positionierfehler von ± 2 mm bzw. $\pm 0,2^\circ$ werden durchgeführt. Es lässt sich feststellen, dass mit zunehmender initialer Fläche der Elektroden und damit auch der späteren Batteriezellen die prozentuale Überdeckung steigt. Darüber hinaus entwickeln (Schmitt & Raatz et al. 2014) auch einen Ansatz zur selektiven Stapelbildung. Das Ziel ist dabei die Identifikation optimaler Anoden- und Kathodenpaare, um Schwankungen aus dem Beschichtungsprozess ausgleichen zu können, sodass in Summe eine höhere Zellkapazität erzielt werden kann. Hierfür wird ein Optimierungsproblem abgeleitet, das mittels des Kuhn-Munkres-Algorithmus gelöst wird.

2.4 Ableitung des Defizits im Stand der Forschung und Technik

Der Stand der Forschung und Technik wird im Folgenden bewertet. Anschließend werden Defizite identifiziert, die in der vorliegenden Arbeit aufgelöst werden sollen.

2.4.1 Bewertung des Stands der Forschung und Technik

Ausgehend von der Prozesskette der Batteriezellfertigung wurden die Prozessschritte Kalandrierung, Slitting, Vereinzelung sowie die Stapelbildung mit Einzelblattelektroden im Detail erläutert.

Es zeigt sich, dass die Kalandrierung von Elektroden als Verfahren bereits in vielen Quellen untersucht wird. Der Fokus der Untersuchungen liegt häufig in den Wechselwirkungen des Kalandrierprozesses und der Elektrode. Großflächige Untersuchungen geometrischer Fehlerbilder nach der Kalandrierung werden oft nur qualitativ beschrieben, während quantitative Untersuchungen in der Literatur nur in begrenztem Umfang

vorliegen. Insbesondere die Quantifizierung der Mitten- und Randwellen findet nur in eingeschränktem Maß oder in ausgewählten Materialsystemen statt.

Bei der Untersuchung der Kalandrierung auf prozessübergreifende Auswirkungen steht häufig die elektrochemische Funktion der späteren Batteriezelle im Fokus, allerdings existieren auch Arbeiten mit dem Ziel, die Auswirkungen auf die Folgeprozesse besser zu verstehen. So ist der Einfluss der Kalandrierung auf das Slitting in Bezug auf den auftretenden Cambereffekt bereits in ersten Arbeiten experimentell untersucht.

Hinsichtlich des Slittings und der Vereinzelung finden sich in der Literatur Daten zu erzielbaren Toleranzen in der Länge als auch der Breite der Elektrodenblätter. Auch finden sich einige Untersuchungen zur resultierenden Schnittkantenqualität nach der Vereinzelung mittels mechanischen als auch thermischen Verfahren. Weitere Charakterisierungen, insbesondere im Hinblick auf eine mögliche dreidimensionale Geometrie des Einzelblattes in Abhängigkeit der Welligkeiten nach der Kalandrierung, liegen jedoch nicht vor.

Bei der Stapelbildung zeigt sich eine große Vielfalt der produktseitigen Gestaltungsmöglichkeiten des Zellstapels, was zu einer großen Variation der Stapelverfahren führt. Im Hinblick auf die Stapelbildung mit Einzelblattelektroden zeigen sich der Einzelblattstapelprozess und das Z-Falten als etablierte Verfahren. Die Analyse der beiden Verfahren verdeutlicht allerdings, dass die anlagentechnische Umsetzung im Detail stark variiert und keine standardisierte Prozessgestaltung vorliegt. Zudem existieren forschungsseitig einige Aktivitäten, die Stapelbildung zu optimieren. Häufig stehen hierbei entweder die Verbesserung der Durchsatzgeschwindigkeit oder die Formatflexibilität des Zellstapels im Fokus. Experimentelle Untersuchungen werden zur Validierung neuer Anlagenkonzepte und deren Einzelprozesse durchgeführt, während zur Bewertung des Stapelergebnisses die Stapelgenauigkeit eine herausragende Bedeutung einnimmt. Darüber hinaus findet sich in der Literatur eine systematische Analyse der Einflussgrößen auf die Stapelbildung, wobei der Fokus mehr auf die qualitativen Wirkzusammenhänge als auf deren Quantifizierung gelegt wird, um eine an die Wirkzusammenhänge angepasste, flexible Anlagentechnik zu entwickeln.

Für die Einzelblattstapelbildung fehlen quantifizierende Untersuchungen der einzelnen Subprozessschritte, um Aussagen über die resultierende Stapelgenauigkeit erzielen zu können. Stapelanlagenhersteller geben zwar ihre erzielte Gesamtgenauigkeit an, brechen diese aber nicht auf die einzelnen Subprozessschritte und deren Auswirkungen

auf die Stapelgenauigkeit herunter. Darüber hinaus ist der Einfluss auf die Stapelgenauigkeit von unterschiedlichen Elektrodenmaterialien und deren vorheriger Prozessierung bisher quantitativ nicht untersucht worden. Hierzu wird in der Literatur zwar deutlich, dass insbesondere die Kalandrierung einen Einfluss auf die Stapelgenauigkeit vermuten lässt, allerdings wurde diese Annahme bislang noch nicht quantifiziert.

Im Bereich der Modellierung und Simulation des Stapelprozesses liegen in der Literatur einige Ansätze vor. So werden bereits das Z-Falten, die rotative Hochdurchsatzstapelbildung sowie ein dem Z-Falten ähnlicher Prozess mit kontinuierlicher Separatorführung modelliert und simuliert. Die Einzelblattstapelbildung ist in allen Ansätzen jedoch nicht Teil der Betrachtung. Ebenso existiert ein einfaches geometrisches Modell basierend auf einer gegebenen Toleranzverteilung der Elektrodenblattabmaße, jedoch ohne Berücksichtigung materialeseitiger Effekte. Zusätzlich findet sich in der Literatur die Simulation eines Handhabungsprozesses von Elektroden, der allerdings nicht mit der Stapelgenauigkeit in den Kontext gesetzt wird und sich auf ein in der Industrie nicht etabliertes, neues Verfahren bezieht.

Für die prozesseitige Modellierung des Materialverhaltens der Elektroden werden hauptsächlich elastische oder isotrop elastisch-plastische Materialmodelle verwendet, wobei das Aktivmaterial und das Substrat meist nicht getrennt, sondern als homogener Verbund modelliert werden. Die Ermittlung der Materialparameter wird mit etablierten und vergleichsweise einfachen Methoden durchgeführt, wofür meist Zug- bzw. Druckversuche an der gesamten Elektrode durchgeführt werden. Es stellt sich jedoch die Frage, ob hiermit die Biegeeigenschaften der dreischichtigen Elektroden ausreichend genau abgebildet werden können. Komplexere Materialmodelle werden für die Simulation der Verformung von Batteriezellen oder deren Komponenten unter Last verwendet. Es werden meist das Aktivmaterial und das Substrat getrennt voneinander modelliert und diskretisiert, wobei für das Aktivmaterial häufig ein Crushable Foam Materialmodell verwendet wird. Bei dieser Art von Materialmodellen ist der Aufwand zur Ermittlung der Parameter sowie auch die notwendige Rechenzeit häufig sehr hoch. In der Gegenüberstellung sind zur Auswahl eines geeigneten Materialmodells der Aufwand zur Ermittlung der Parameter, die Rechenzeit sowie der Zweck der Modellierung abzuwägen.

2.4.2 Ableitung des Defizits

Im Kontext der Elektromobilität rückt die Herstellung großformatiger Batteriezellen in den Fokus. Die Kalandrierung, Vereinzelung und Stapelbildung sind dabei unverzichtbare Prozessschritte. Basierend auf der Analyse und Bewertung des Stands der Forschung und Technik zeigt sich, dass für die einzelnen Prozessschritte bereits ein gutes Grundverständnis besteht. Die Abhängigkeit der jeweiligen Prozesse von ihren vorherigen Prozessschritten und den dort eingestellten Produkteigenschaften ist in der Literatur erkannt worden, wobei die Wirkzusammenhänge im Detail jedoch weitestgehend noch nicht verstanden sind. Es gibt zwar bereits Untersuchungen zu den Auswirkungen der Kalandrierung auf das Slitting und den dort auftretenden Cambereffekt, die weiterführende Betrachtung der Auswirkungen der Kalandrierung und der Vereinzelung auf die Geometrie des Einzelelektrodenblatts sind jedoch lediglich erkannt, aber nur unzureichend untersucht worden. Folgerichtig ist auch zu erwarten, dass das vereinzelte Elektrodenblatt einen Einfluss auf die Einzelblattstapelbildung und die resultierende Stapelgenauigkeit besitzt. Zusammenfassend ist anzunehmen, dass insbesondere die Geometrie des Elektrodenblatts einen wesentlichen Einfluss auf die Stapelbildung und die daraus resultierende Stapelgenauigkeit hat. Diese Geometrie wird wiederum durch die beiden vorhergehenden Prozessschritte der Kalandrierung und der Vereinzelung wesentlich beeinflusst. Sowohl die Auswirkung der beiden Prozessschritte auf die Elektrodengeometrie sowie der Einfluss der Elektrodengeometrie auf die Stapelgenauigkeit sind in der Literatur bisher jedoch nicht untersucht.

Darüber hinaus machen die Vielfalt und die stetige Weiterentwicklung der verwendeten Materialsysteme sowie deren Auswirkung auf die Produktionsprozesse kontinuierliche Anpassungen der Prozessparameter und der Anlagentechnik notwendig. Wirkzusammenhänge müssen erneut untersucht und validiert werden, um den Einfluss geänderter Materialsysteme oder Parameter abschätzen zu können. Da die Anlagentechnik einen hohen Kapitaleinsatz erfordert, können nur sehr eingeschränkt Untersuchungen ausgelagert werden, weswegen zeit- und materialaufwändige Inbetriebnahmephasen erforderlich sind. Abhilfe können Simulationsmodelle der Produktionsprozesse schaffen, die die Anzahl an Experimenten oder den zeitlichen Aufwand mindern. Im Hinblick auf die Einzelblattstapelbildung ist es denkbar, dass ein Modell die Auswirkung geänderter Kalandrier- oder Vereinzelungsparameter und die damit einhergehende Veränderung der Elektrodenblattgeometrie im Hinblick auf die resultierende Stapelgenauigkeit abschätzen kann. Damit könnte ein entsprechendes Modell auch in einer frühen Phase

der Anlagen- und Prozessauslegung unterstützen, um Toleranzgrenzen der Prozesse zielgerichtet zu definieren. In der Literatur existiert allerdings bis zur Entstehung der vorliegenden Arbeit kein entsprechendes Modell der Einzelblattstapelbildung.

Basierend auf dem identifizierten Defizit lassen sich die folgenden vier Forschungsfragen ableiten:

- Welche Auswirkungen hat die Kalandrierung auf die Geometrie der vereinzelter Elektrodenblätter?
- Wie wirkt sich die Geometrie auf die Stapelgenauigkeit des Einzelblattstapelprozesses aus?
- Wie kann die Einzelblattstapelbildung mit der resultierenden Stapelgenauigkeit in Abhängigkeit der Geometrie der Einzelblattelektrode prozessseitig modelliert werden?
- Wie kann das Elektrodenblatt materialseitig modelliert werden, sodass auch großformatige Elektroden mit vertretbarem Rechenaufwand, geringem experimentellen Aufwand und hinreichender Genauigkeit simuliert werden können?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird im folgenden Kapitel die präzisierte Zielstellung und die Vorgehensweise erläutert.

3 Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise

Basierend auf der Analyse und Bewertung des Stands der Forschung und Technik sowie dem abgeleiteten Defizit wird die Zielsetzung in Kapitel 3.1 dargestellt. In Kapitel 3.2 folgt die Vorgehensweise und Struktur, mit der die Forschungsfragen gelöst werden sollen.

3.1 Präzisierte Zielsetzung

Die Batteriezellfertigung setzt sich aus komplexen Einzelprozessschritten zusammen, die sequenziell miteinander verkettet sind. Bei der Kalandrierung zeigen sich jedoch in Abhängigkeit der Parametereinstellungen geometrische Fehlerbilder in der Elektrode, die möglicherweise die Folgeprozesse negativ beeinflussen können. Insbesondere aufgrund der welligen Deformation der Elektrode stellt sich die Frage, inwiefern sich diese auf die Geometrie eines vereinzelt Elektrodenblatts auswirkt und welchen Einfluss dessen Geometrie wiederum auf die Stapelgenauigkeit des Elektroden-Separator-Verbundes nimmt.

Darüber hinaus macht bei flexiblen Anlagen die Verarbeitung verschiedener Materialsysteme eine kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter unter Einhaltung der geforderten Prozesstoleranzen notwendig. Auch auf Seiten der Anlagenhersteller müssen teilweise individuelle Anlagen, beispielsweise mit speziellem Format, entwickelt werden, sodass bei der Inbetriebnahme häufig langwierige Inbetriebnahmeprozesse und Optimierungsschleifen getätigt werden müssen. Experimentelle Untersuchungen stellen dabei insbesondere bei der Untersuchung prozessübergreifender Zusammenhänge einen großen Aufwand dar. Häufig sind diese auch aufgrund fehlenden Materials oder fehlender Anlagentechnik nicht durchführbar. Ein Simulationsmodell kann hierbei helfen, den Aufwand zu reduzieren, indem die Stapelgenauigkeit auf Basis der gegebenen Elektrodengeometrie simuliert wird. Dadurch können Einflüsse der Kalandrierung und Vereinzelung auf die Stapelgenauigkeit im frühen Stadium abgeschätzt werden, ohne umfangreiche Experimente durchführen zu müssen.

Das Ziel für die vorliegende Arbeit ist daher, den Einfluss der Geometrie der Elektrodenblätter auf die Stapelgenauigkeit bei der Einzelblattstapelbildung zu untersuchen. Auf Basis der erkannten Wirkzusammenhänge soll ein Modell entwickelt werden, das die Stapelgenauigkeit in Abhängigkeit der wesentlichen Einflüsse abbilden kann.

Ausgehend von der Einzelblattstapelbildung muss zunächst aufgrund der in der Literatur zu findenden unterschiedlichen Prozessausführungen ein Referenzprozess definiert werden, der industriell relevante Basisfunktionen abbildet, sodass die Erkenntnisse auch in die Industrie transferiert werden können. Auf Basis dieses Referenzprozesses werden systematisch relevante Einflussgrößen auf die Stapelgenauigkeit identifiziert und im Hinblick auf die Elektrodenblattgeometrie spezifiziert.

Die Analyse des Stands der Forschung und Technik zeigt, dass insbesondere die Prozessschritte Kalandrieren und Vereinzeln einen Einfluss auf die Elektrodengeometrie besitzen, die Wirkzusammenhänge über Prozessgrenzen hinweg aber noch nicht verstanden sind. Hierzu sollen experimentelle Untersuchungen sowie in der Literatur bereits verfügbare Erkenntnisse genutzt werden, sowohl den Einfluss der Kalandrierung mit den dort auftretenden Welligkeiten als auch den Einfluss der Vereinzelnung auf die Elektrodengeometrie zu untersuchen. Anschließend sollen die Ergebnisse genutzt werden, den Einfluss der charakterisierten Geometrieausprägungen auf die Stapelgenauigkeit anhand des Referenzprozesses experimentell zu untersuchen. Die Untersuchungen fokussieren sich auf die Kathode, da bei der Anode deutlich geringere Welligkeiten nach der Kalandrierung zu beobachten sind.

Diese Ergebnisse sollen genutzt werden zielgerichtet ein FE-Modell zu entwickeln, das unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussgrößen einen Rückschluss auf die Stapelgenauigkeit zulässt. Die Validierung des Modells soll mithilfe der durchgeführten Stapelversuche erfolgen. Abschließend soll die Anwendung des Modells exemplarisch gezeigt werden. Hierfür wird der Einfluss des Cambereffekts auf die Stapelgenauigkeit simulativ untersucht. Zusammengefasst findet sich das Zielbild in Abbildung 3-1.

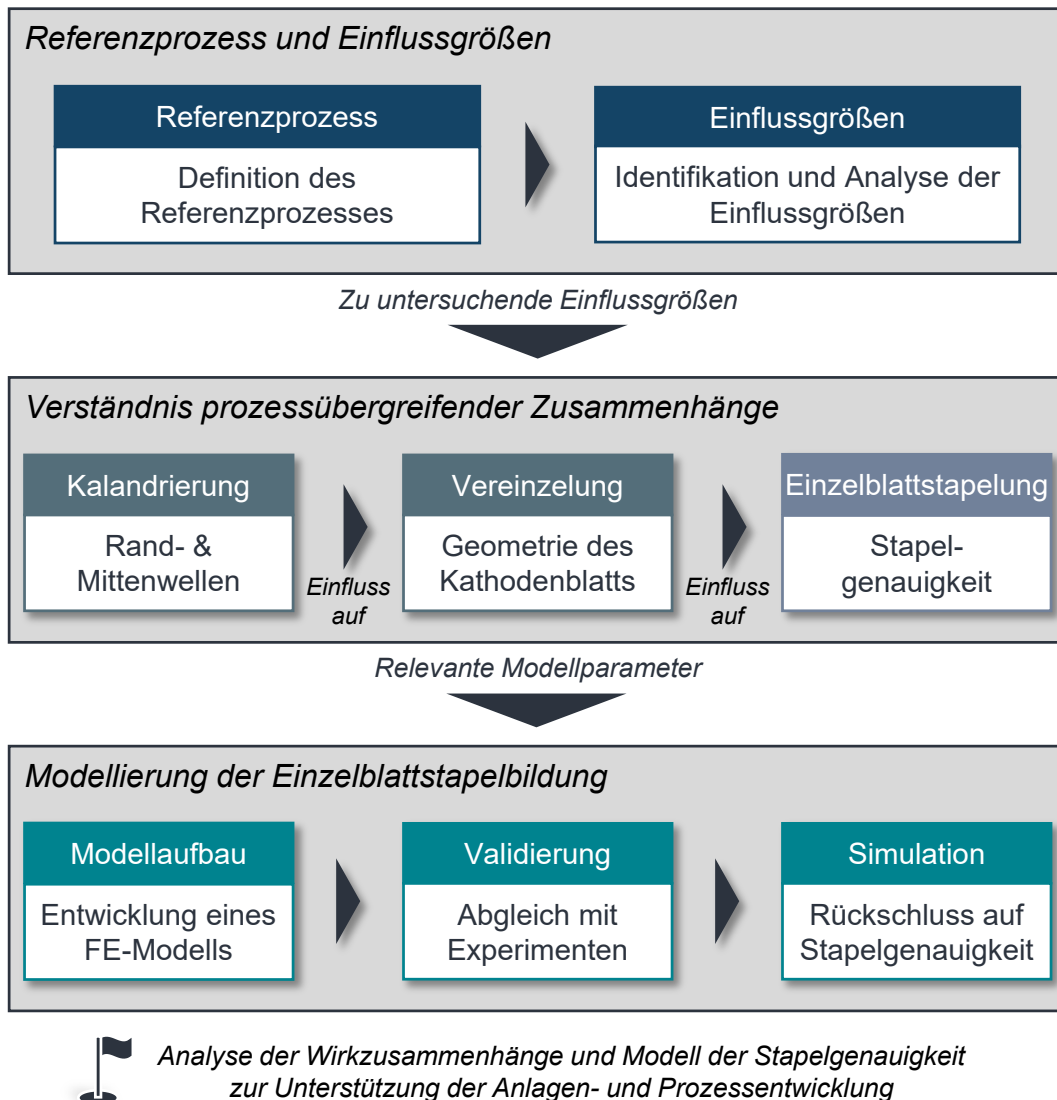


Abbildung 3-1: Zielbild der vorliegenden Arbeit

3.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung ist in Abbildung 3-2 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben.



Abbildung 3-2: Gewählte Vorgehensweise zur Behebung des Forschungsdefizits

In Kapitel 4 wird der Prozess der Einzelblattstapelbildung analysiert. Hierzu wird in Kapitel 4.1 ein Referenzprozess abgeleitet, der für die experimentellen und simulativen Untersuchungen in der Arbeit dient. Anschließend werden in Kapitel 4.2 basierend auf dem Referenzprozess die Einflussgrößen auf die Stapelgenauigkeit systematisch abgeleitet.

In Kapitel 5 wird die Geometrie der vereinzelter Einzelblattelektroden in Abhängigkeit der Kalandrierung untersucht. Hierfür werden in Kapitel 5.1 die zu erwartenden Geometrieinflüsse analysiert und mit bestehendem Literaturwissen abgeglichen, sodass zielgerichtet die durchzuführenden Untersuchungen festgelegt werden können. In Kapitel 5.2 werden ein geeignetes experimentelles Vorgehen abgeleitet und unterschiedliche Materialkonfigurationen und Prozessparametereinstellungen ausgewählt. In Kapitel 5.3 werden die Messergebnisse der entstehenden Fehlerbilder nach der Kalandrierung ausgewertet und bewertet. Der Fokus liegt hierbei auf den Rand- und Mittenwel-

len. Aus den prozessierten Elektroden werden in Kapitel 5.4 anschließend Einzelblattelektroden hergestellt, optisch vermessen und deren Geometrien in Abhängigkeit der Fehlerbilder nach der Kalandrierung charakterisiert.

Die vereinzelt Elektroden werden genutzt, um in Kapitel 6 deren Einfluss auf den Einzelblattstapelprozess zu untersuchen. Hierzu wird in Kapitel 6.1 ein geeigneter Versuchsstand entwickelt, mithilfe dessen die einzelnen Prozessabschnitte systematisch untersucht werden können. Basierend auf den vorliegenden Elektrodenblättern in unterschiedlichen Konfigurationen wird ein Versuchsplan entworfen, s. Kapitel 6.2. In den Kapiteln 6.3–6.6 werden die Ergebnisse der einzelnen Prozessabschnitte vorgestellt und hinsichtlich des Einflusses auf die Stapelgenauigkeit bewertet.

In Kapitel 7 wird ein FE-Modell entwickelt und validiert, das auf Basis der experimentellen Ergebnisse die wesentlichen Einflussparameter auf die Stapelgenauigkeit abbildet. Hierzu wird in Kapitel 7.1 zunächst der Modellaufbau vorgestellt sowie ein Ansatz zur Modellierung der Kathode entwickelt. Im Anschluss wird das Modell in Kapitel 7.2 anhand der experimentellen Ergebnisse validiert. Exemplarisch wird in Kapitel 7.3 das Modell angewendet, um die Auswirkung des Cambereffekts auf die Stapelgenauigkeit zu untersuchen. Abschließend wird eine Bewertung des Modells durchgeführt.

4 Analyse der Einzelblattstapelbildung

Im folgenden Kapitel wird die Einzelblattstapelbildung für Pouchzellen im Hinblick auf die notwendigen Prozessschritte sowie die relevanten Parameter analysiert. Es wird ein Referenzprozess erarbeitet, der als Grundlage für die weiteren Arbeiten der vorliegenden Dissertation dient, s. Kapitel 4.1. Auf Basis des Referenzprozesses werden Kapitel 4.2 anschließend die Einflussgrößen auf die Stapelgenauigkeit identifiziert.

4.1 Ableitung eines Referenzprozesses

Aufgrund der unterschiedlichen Prozessführungsarten und der damit verbundenen Gestaltung der Anlagentechnik wird eine Funktionen- und Systemanalyse der Einzelblattstapelbildung durchgeführt. Darauf basierend wird ein für die vorliegende Arbeit geltender Referenzprozess definiert.

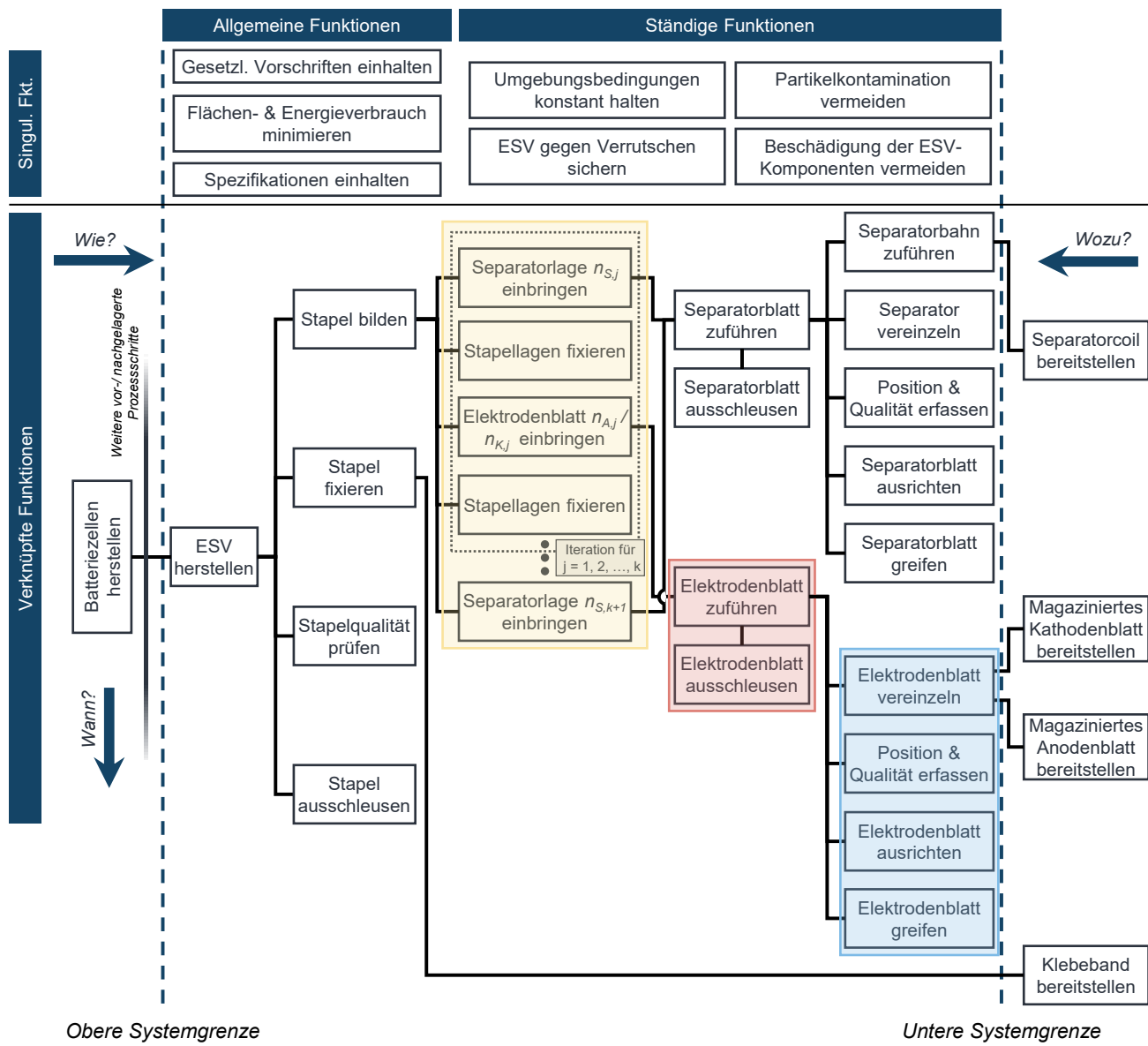
4.1.1 Funktionen- und Systemanalyse des Einzelblattstapels

Zur systematischen Analyse der Einzelblattstapelbildung bietet sich eine abstrahierte Darstellung der umgesetzten Funktionen an, die je nach Systemgrenze nahezu in allen Maschinen zu finden sind. Nach (Gericke & Bender et al. 2021, S. 244) lässt sich bei vorhandenen Produkten die Untergliederung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen mittels der Function Analysis System Technique (FAST)-Methode durchführen, welche erstmals 1965 von Charles W. Bytheway vorgestellt wurde (Bytheway 2007, S. xiii). In Ermangelung an konkreten Handlungsanweisungen wurde die Methode in die VDI-Norm 2803 überführt, auf Basis dessen die Funktionenanalyse für die Stapelbildung durchgeführt wird (VDI 2803 Blatt 1).

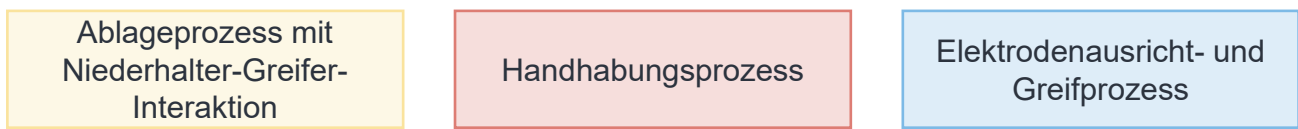
Der Kern hierfür ist das FAST-Diagramm. Unter Berücksichtigung der gesetzten Systemgrenzen werden die verknüpften Funktionen von links nach rechts mittels der Frage „Wie?“ in immer feinere Subfunktionen unterteilt, sodass ein Funktionsbaum für die gewünschte Ausgangsfunktion, hier „Elektroden-Separator-Verbund (ESV) herstellen“, resultiert. Von rechts nach links ergibt sich umgekehrt mit der Frage „Wozu?“ die logische Struktur. Die zeitliche Abfolge der Funktionen wird durch die Anordnung von oben nach unten mit der Frage „Wann?“ dargestellt. Singuläre, nicht verkettete Funktionen werden gesondert aufgeführt. (VDI 2803 Blatt 1)

In Abbildung 4-1 ist das ausgearbeitete FAST-Diagramm für die Funktion „ESV herstellen“ dargestellt. Die Granularität wird so gewählt, dass der Fokus auf dem Pfad von den

vereinzelt Elektroden zum fertigen Stapel liegt. Auf Basis des entwickelten Funktionsbaums sowie existierender Literaturquellen können im Sinne einer modularen Bauweise die drei, für diese Arbeit relevanten Module Ausricht- und Greifprozess, Handhabungsprozess und Ablageprozess mit Niederhalter-Greifer-Interaktion abgeleitet werden. Der Einteilung liegt die Annahme zugrunde, dass sich die Stapelgenauigkeit bei richtiger Prozessführung in der Funktion „Stapel bilden“ und deren Subfunktionen ausbildet, da bei den Funktionen „Stapel fixieren“, „Stapelqualität prüfen“ und „Stapel ausschleusen“ eine durchgängige Fixierung des Stapels sichergestellt werden muss. Entsprechend ist hierzu die ständige Funktion „ESV gegen Verrutschen sichern“ aufgeführt. Darüber hinaus wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Stapelgenauigkeit anhand der Position der Elektroden bewertet, weswegen die Zuführung und Ablage des biegeschlaffen Separators auf den Stapel nicht im Fokus steht.



Fokussierte Prozessmodule:



Legende:

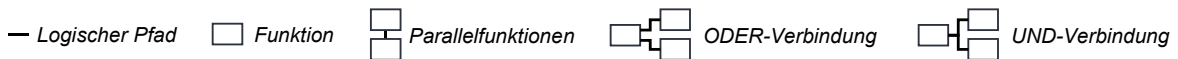


Abbildung 4-1 FAST-Diagramm für die Stapelbildung von Elektroden-Separator-Verbänden (ESV) in Anlehnung an (VDI 2803 Blatt 1)

4.1.2 Definition des Referenzprozesses

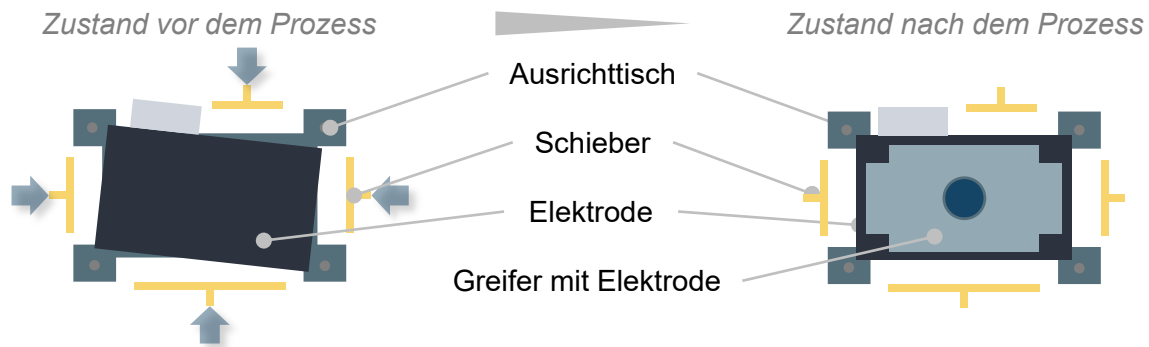
Auf Basis der Funktionenanalyse wird für die vorliegende Arbeit ein Referenzprozess definiert, der aus den drei Prozessmodulen Ausricht- und Greifprozess, Handhabungsprozess und Ablageprozess mit Niederhalter-Greifer-Interaktion besteht. Aufgrund der vielen Gestaltungsmöglichkeiten in der konkreten Prozessausführung in Abhängigkeit der späteren Batteriezellgeometrie wird zur Einschränkung die am Batterietechnikum (BATEC) des Karlsruher Instituts für Technologie verwendete Geometrie für großformatige Pouchzellen als Referenz zugrunde gelegt. Dies hat zum Vorteil, dass die am BATEC vorhandenen Anlagen und Werkzeuge genutzt werden können. Zur Visualisierung findet sich die Batteriezelle sowie deren Bestandteile in Abbildung 4-2.



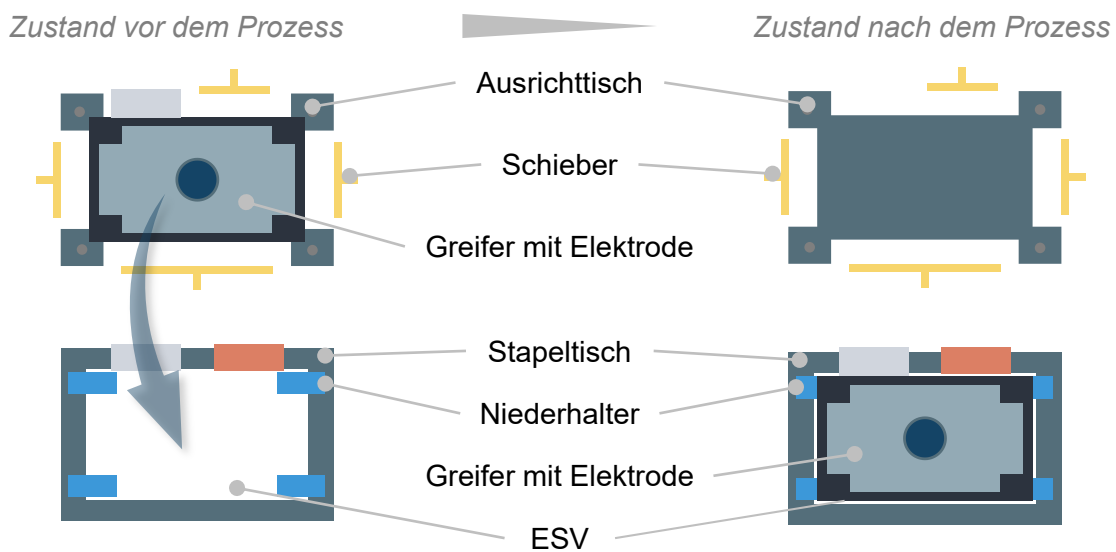
Abbildung 4-2: Als Referenz verwendete Batteriezelle des Batterietechnikums (BATEC) des Karlsruher Instituts für Technologie

Gemeinsam mit dem FAST-Diagramm und der Referenzpouchzelle lässt sich ein geeigneter Referenzprozess mit den zugehörigen Systemgrenzen definieren, der in Abbildung 4-3 schematisch dargestellt ist und im Folgenden beschrieben wird. Bei der Festlegung der Prozessschritte wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Funktionen entsprechend den Berichten aus der Literatur eine anwendungsorientierte, industrielle Relevanz besitzen.

I. Elektrodenausricht- und Greifprozess



II. Handhabungsprozess



III. Ablageprozess mit Niederhalter-Greifer-Interaktion

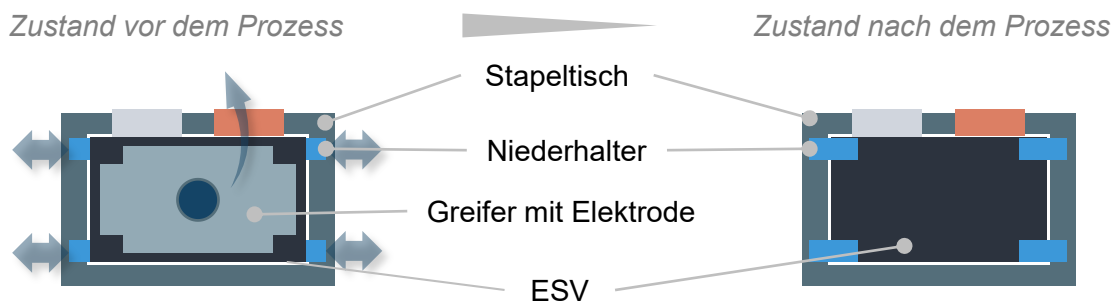


Abbildung 4-3: Definierter Referenzprozess der im Rahmen der Arbeit betrachteten Einzelblattstapelbildung

Für den **Elektrodenausricht- und Greifprozess** wird ein vereinzeltes Elektrodenblatt zugeführt und auf den Ausrichttisch gelegt. Die Position des Elektrodenblattes ist noch undefiniert. Für die Zentrierung und damit die Positionsdefinierung wird sich für eine mechanische Ausrichtung entschieden. Die Ausrichtung wird so durchgeführt, dass vier mechanische Schieber zur Mitte des Ausrichttischs fahren, bis die Schieber die Kanten

des Ausrichttischs, welche als Anschlag für die Schieber dienen, erreichen. In der Bewegung berühren die Schieber die Elektrode und überführen diese aus der initialen, undefinierten Lage in eine definierte. Anschließend erfolgt der Greifprozess. Der Greifer, der industrietypisch als Niederdruckflächengreifer ausgeführt wird, senkt sich auf die Elektrode bis zur Kontaktherstellung ab und saugt diese an die Greiffläche an. Anschließend fahren die Schieber zurück. Im **Handhabungsprozess** bewegt sich der Greifer mit der gegriffenen Elektrode und positioniert diese auf dem Stapeltisch und dem sich dort befindenden Stapel. Im anschließenden **Ablageprozess** wird die Elektrode auf die vier Niederhalter abgelegt, wodurch sie sich an diesen Stellen aufwölbt. Aus diesem Grund ist der Greifer derart konstruiert, dass Aussparungen an der Greiffläche eine Lücke für jeden Niederhalter vorsehen und somit keine Kollision auftritt. Der Greifer drückt bei der Ablage auf den Stapel und fixiert diesen zunächst zusätzlich zu den Niederhaltern. In der **Niederhalter-Greifer-Interaktion** lockern die Niederhalter die Fixierung des Stapels und fahren aus der Mitte heraus, sodass sich die aufgebotenen Elektrodenteile nach unten senken können. Anschließend verfahren die Niederhalter wieder zur Mitte und senken sich in den Aussparungen des Greifers auf den Stapel ab und fixieren diesen wieder zunächst zusätzlich zum Greifer. Abschließend lockert der Greifer seinerseits die Fixierung des Stapels und verfährt zum Ausrichttisch, um die nächste Elektrode aufzunehmen. Ziel der Niederhalter-Greifer-Interaktion ist die durchgängige Fixierung des Stapels. Der beschriebene Ablauf wird im Wechselspiel mit Separator, Anode, Separator, Kathode so oft wiederholt, bis die gewünschte Stapelhöhe erreicht ist, wobei für die erzielte Stapelgenauigkeit die Position der einzelnen Komponenten entscheidend ist.

Da sich die durchgeführten Untersuchungen auf die Kathode fokussieren und die absolute Position des Kathodenblatts als Maß verwendet wird, wird für die vorliegende Arbeit die Stapelgenauigkeit entsprechend Kapitel 2.2.4.3 und Abbildung 2-13 wie folgt definiert:

- Bemaßungskomponenten:
Kathodeneinzelblätter (*artgleiche Einzelkomponenten*);
- Bemaßungsreferenz:
Vier Eckpunkte des Kathodeneinzelblatts über die jeweils ein rechteckiges Toleranzfenster gelegt wird (*Endfläche*);

- Vergleichskomponenten:

Alle Kathodeneinzelblätter des Stapels werden für die Stapelgenauigkeit betrachtet (*Gesamtgenauigkeit*).

Zum besseren Verständnis findet sich in Abbildung 4-4 eine entsprechende Visualisierung der verwendeten Definition der Stapelgenauigkeit.

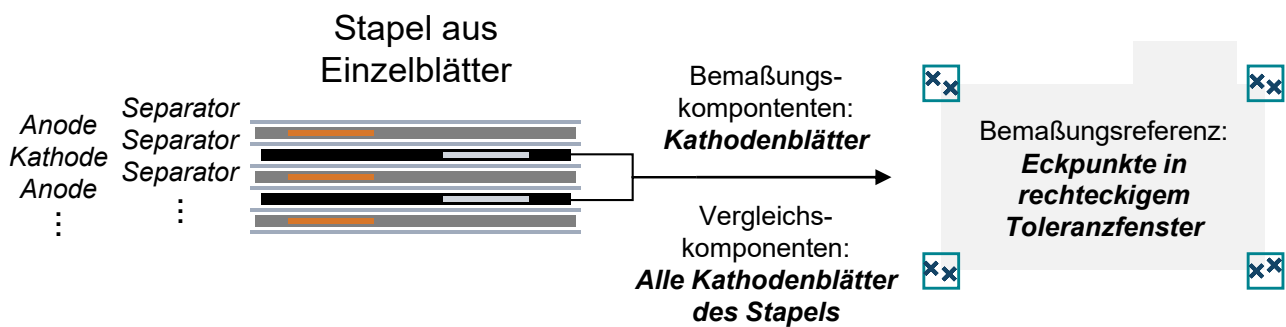


Abbildung 4-4: Visualisierung der verwendeten Definition der Stapelgenauigkeit

4.2 Identifikation und Analyse der Einflussgrößen auf die Stapelgenauigkeit

Der in Kapitel 4.1.1 definierte Prozess der Einzelblattstapelbildung kann bei entsprechender Granularität als kleinste Wertschöpfungseinheit in der Batteriezellfertigung aufgefasst werden, die (Schönemann 2017, S. 64–65) aus der abstrahierten Darstellung eines Produktionsprozesses als Input-Throughput-Output-Prozess ableitet (vgl. Dyckhoff & Spengler 2010, S. 13). Diese Einheit besteht aus dem Zusammenspiel zwischen den Elementen Maschine, Prozess und Produkt sowie der Transformation des Produktzustands n in den Zustand $n+1$. Für eine bessere Übersicht wird der definierte Einzelblattstapelprozess zunächst als Black Box aufgefasst. Zu den drei Elementen Maschine, Prozess und Produkt lassen sich entsprechend zugehörige Parameter bzw. Kenngrößen zuordnen, die die resultierende Stapelgenauigkeit beeinflussen. Der Logik folgend können diese in Maschinenkenngrößen sowie Prozess- und Produktparameter untergliedert werden. Hinsichtlich der Produktparameter wird im Kontext der Batteriezellfertigung häufig auch von Strukturparametern gesprochen (s. beispielsweise Thomitzek & Schmidt et al. 2021; Ventura Silva & Thomitzek et al. 2023; Zanotto & Dominguez et al. 2022), weswegen dieser Begriff hier verwendet wird. Der beschriebene Zusammenhang ist in Abbildung 4-5 dargestellt, welcher in (A_Fuchs 2023) und

(A_Könn 2022) weiterentwickelt und für die vorliegende Arbeit nochmals detailliert wurde.

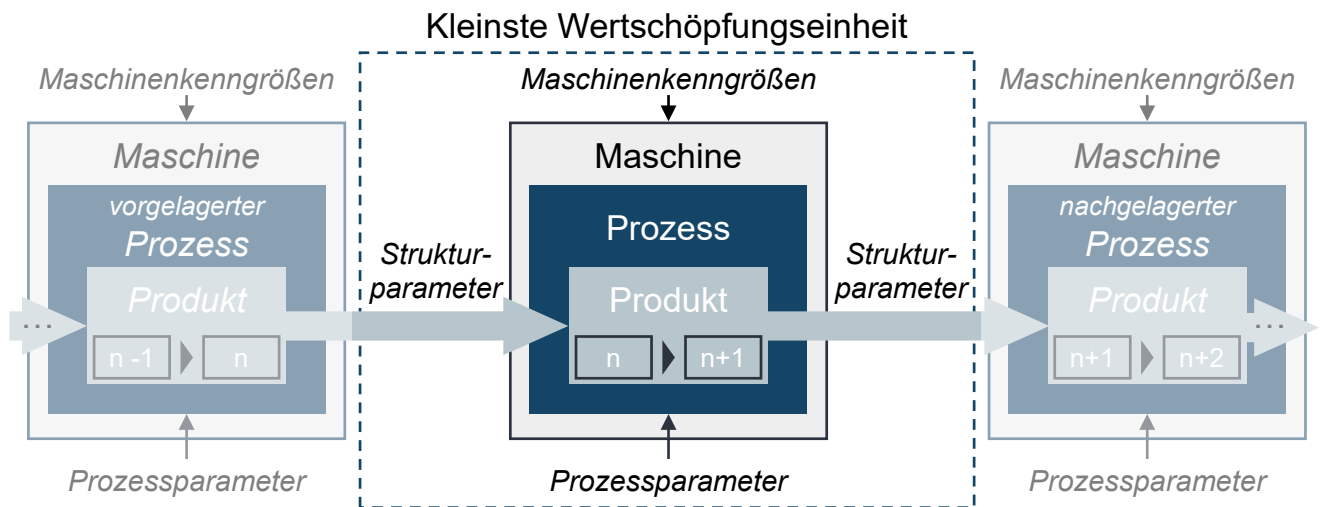


Abbildung 4-5: Darstellung des Einzelblattstapelprozesses als kleinste Wertschöpfungseinheit in Anlehnung an (A_Fuchs 2023; A_Könn 2022; Schönemann 2017, S. 65)

Präzisierend können die drei Parameterarten in Anlehnung an (A_Fuchs 2023) wie folgt beschrieben werden, wobei anzumerken ist, dass in der Literatur keine einheitliche Definition im Kontext der Batteriezellfertigung existiert:

Maschinenkenngrößen

Maschinenkenngrößen beschreiben die hardwareseitigen Ausprägungen und konstruktiven Eigenschaften der Maschine und können während des Fertigungsprozesses nicht verändert werden. Als Beispiele lassen sich im Stapelkontext die konstruktive Umsetzung der verwendeten Greifer oder auch die Anzahl und Positionierung der Niederhalter anführen. Darüber hinaus fallen in diese Kategorie auch Fertigungs- und Montagetoleranzen, die sich durch die integrierten Maschinenkomponenten einstellen. Auch softwareseitige Ausprägungen, beispielsweise die Steuerungsarchitektur oder das Betriebssystem, können zu den Maschinenkenngrößen zugeordnet werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Relevanz für die vorliegende Arbeit werden diese im Folgenden jedoch nicht weiter berücksichtigt. (Schönemann 2017, S. 94–95; Zanotto & Dominguez et al. 2022)

Prozessparameter

Als Prozessparameter werden nach (Turetsky & Thiede et al. 2020) die Parameter der individuellen Prozessschritte verstanden, die die Strukturparameter der Zwischenprodukte beeinflussen und sich somit auf die Eigenschaften der Batteriezelle auswirken. (Zanotto & Dominguez et al. 2022) hingegen differenzieren an dieser Stelle zwischen Maschinen- und Prozessparameter. Als entscheidender Unterschied wird die Steuerbarkeit des Parameters angeführt. Maschinenparameter können demnach von außen beeinflusst werden. Prozessparameter sind zwar das Ergebnis der Maschinenparameter, können allerdings nicht direkt von außen gesteuert werden. (Kwade & Haselrieder et al. 2018) und (Thomitzek & Schmidt et al. 2021) differenzieren nicht zwischen Maschinen- und Prozessparameter, sondern verwenden lediglich den Begriff Prozessparameter. Aufgrund der deutlicheren Abgrenzung zu den Maschinenkenngößen wird für die vorliegende Arbeit ebenso der Begriff Prozessparameter verwendet.

Strukturparameter

Strukturparameter beschreiben inhärente Eigenschaften des (Zwischen-)Produkts und stellen die Schnittstelle zwischen den einzelnen Prozessschritten der Batteriezellfertigung dar. (Turetsky & Wessel et al. 2020) sprechen in diesem Kontext auch von Zwischenproduktmerkmalen („intermediate product features“). (Zanotto & Dominguez et al. 2022) differenzieren die Strukturparameter weiter als Parameter, die entweder dem Material inhärent sind, innerhalb eines Prozesses verändert werden oder auch neu in einem Prozess entstehen können. Als Beispiele lassen sich die Dicke der Elektrodenblätter, die Dichte des Aktivmaterials oder auch die Anzahl der Stapellagen nach der Stapelbildung nennen.

Zur Identifikation und Analyse der Einflussgrößen auf die Stapelgenauigkeit wird eine Ursache-Wirkungs-Analyse durchgeführt und mittels Ishikawa-Diagramm visualisiert. Häufig werden hierbei die Haupteinflussgrößen in „fünf Ms“, also Mensch, Maschine, Material, Milieu und Methode, unterteilt (Brüggemann & Bremer 2020, S. 23). Aufgrund des hohen Automatisierungsgrads, der konstanten Umgebungsbedingungen in industriellen Batteriezellfertigungen sowie des festgelegten Referenzprozesses ist die klassische Aufteilung hier jedoch nicht zielführend. Aus diesem Grund werden die Einflussgrößen in die beschriebenen Maschinenkenngößen, Prozess- und Strukturparameter kategorisiert. Es ist anzumerken, dass es sich bei der Stapelgenauigkeit, die als Zielgröße dient, auch um einen Strukturparameter handelt, der jedoch erst innerhalb des

Einzelblattstapelprozesses entsteht. Darüber hinaus wird der Einzelblattstapelbildungsprozess zunächst als Black Box behandelt. In Abbildung 4-6 ist das erarbeitete Ishikawa-Diagramm zu sehen, das auf den angeleiteten studentischen Arbeiten (A_Fuchs 2023), (A_Könn 2022) und (A_Freyd 2022) basiert und für die vorliegende Arbeit weiterentwickelt wurde.

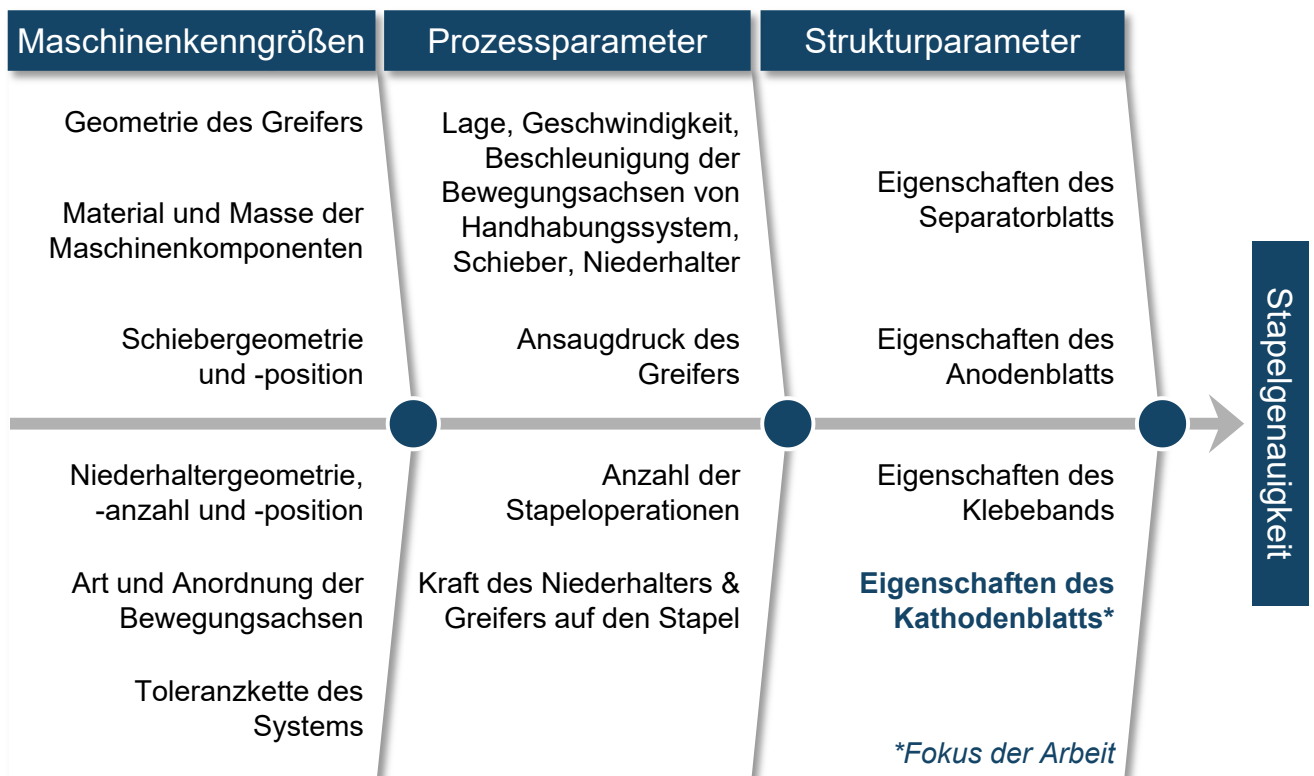


Abbildung 4-6: Ishikawa-Diagramm für die resultierende Stapelgenauigkeit aus der Einzelblattstapelbildung als Black-Box-Modell in Anlehnung an (A_Freyd 2022; A_Fuchs 2023; A_Könn 2022)

Die Ursache-Wirkungs-Analyse zeigt, dass eine große Anzahl an Kenngrößen und Parameter identifiziert werden kann, die einen Einfluss auf die Stapelgenauigkeit besitzen. Bei einer feineren Granularität der Analyse ist zu erwarten, dass das Diagramm deutlich komplexer werden würde, worauf allerdings aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet wird. Während Maschinenkenngößen und Prozessparameter in der Entwicklung neuer Anlagenkonzepte von zentraler Bedeutung sind und hierfür in der Literatur einige Bestrebungen zu finden sind, s. beispielsweise (Boeselager & Müller et al. 2023; Schröder & Aydemir et al. 2016; Storz & Schild et al. 2021; Weinmann & Töpfer et al. 2020), ist der Einfluss der Strukturparameter auf die Qualität der Stapelgenauigkeit bei der Einzelblattstapelbildung bisher kaum untersucht, bzw. wenn dann nur mit einem qualitativen Fokus, s. (Weinmann 2022, S. 62–122). Zuzüglich sprechen insbesondere

die Prozessbeobachtungen der auftretenden Welligkeit bei der Kalandrierung von Kathoden dafür, dass die Effekte auch auf Folgeprozesse einen Einfluss haben können, s. (Günther & Schreiner et al. 2019). Diesbezügliche Beschreibungen für Anoden sind deutlich weniger in der Literatur zu finden. Da die Fertigungsprozesse der Separatorherstellung nicht im Fokus der Arbeit liegen, wird sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit daher auf die Eigenschaften des Kathodenblattes als Strukturparameter und deren Auswirkungen auf die Stapelgenauigkeit fokussiert. Darüber hinaus wird angenommen, dass die finale Fixierung des gestapelten Elektroden-Separator-Verbundes durch ein Klebeband nur einen sehr geringen Einfluss auf die Stapelgenauigkeit besitzt, da der Stapel bei der Applikation des Klebebands flächig fixiert wird. Entsprechend werden die Strukturparameter der Eigenschaften der Kathodenblätter im Folgenden detailliert. Zur Klassifizierung der Eigenschaften eignet sich die von (Günther & Schreiner et al. 2019) vorgestellte Klassifizierung für Elektrodendefekte nach der Kalandrierung. Entsprechend werden die Eigenschaften der Kathodenblätter in Anlehnung an (Mayer & Fleischer 2021) identifiziert und anschließend in geometrische und mechanische sowie Struktureigenschaften untergliedert, s. Tabelle 4-1. In Anlehnung an (Günther & Schreiner et al. 2019) beschreiben geometrische Eigenschaften die Eigenschaften, die eine Änderung der geometrischen Form des Kathodenblattes induzieren, wie beispielsweise Längen- und Breitenmaße oder Ebenheitsabweichungen des Blattes. Die mechanischen Eigenschaften charakterisieren die Reaktion der Kathodenblätter auf äußere Lasteinwirkungen und haben daher insbesondere auf die Prozessierung einen wichtigen Einfluss. Struktureigenschaften stellen die Eigenschaften dar, die die elektrische und elektrochemische Performance der späteren Batteriezelle signifikant beeinflussen, beispielsweise die Art des Beschichtungsmaterialsystems oder die Massenbeladung der Kathoden. (Günther & Schreiner et al. 2019)

Tabelle 4-1: Strukturparameter des vereinzelt Kathodenblattes mit möglichem Einfluss auf die Stapelgenauigkeit nach der Stapelbildung in Anlehnung an (Mayer & Fleischer 2021)

Geometrische Eigenschaften	Mechanische Eigenschaften	Struktureigenschaften
<ul style="list-style-type: none"> • Längen- und Breitenmaße • Ebenheitsabweichung 	<ul style="list-style-type: none"> • Elastizitätsmodul der Beschichtung und des Substrats • Festigkeit der Beschichtung und des Substrats • Adhäsion zwischen Substrat und Beschichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Art des Beschichtungsmaterialsystems und des Substrats • Feuchtigkeitsgehalt der Beschichtung • Massenbeladung • Dichte der Beschichtung • Dicke des Substratmaterials

Es zeigt sich, dass die Eigenschaften eines vereinzelt Kathodenblattes vielfältig sind, was eine Schärfung der zu untersuchenden Aspekte im Hinblick auf die Zielstellung notwendig macht. So tritt bei Überschreiten der Festigkeits- und Adhäsionsgrenzen ein Versagen des Bauteils ein, was ein Ausschleusen des Kathodenblatts zur Folge hat. Im Fokus der Arbeit steht jedoch nicht die Untersuchung der jeweiligen Versagensgrenzen im Prozess, weswegen die Festigkeits- und Adhäsionsgrenzen nicht weiter untersucht werden. Der Elastizitätsmodul spielt zwar für die zu entwickelte Simulation eine wichtige Rolle, allerdings korreliert dieser insbesondere mit der Dichte der Beschichtung, die durch die Kalandrierung eingestellt wird (Zheng & Tan et al. 2012). Aus diesem Grund wird sich lediglich auf die Dichte der Beschichtung fokussiert, die mittels des Verdichtungsgrads bei der Kalandrierung eingestellt wird. Hinsichtlich der Struktureigenschaften des Kathodenblatts ist zu erwarten, dass die Beschichtung ein feuchtigkeitsabhängiges Verhalten zeigt (Heck & Huttner et al. 2023). Die industrielle Produktion wird allerdings in einer gleichbleibend trockenen Umgebung durchgeführt, sodass dort keine großen Schwankungen zu erwarten sind, weswegen dieser Parameter in der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht wird. Als letzte Annahme wird das Substrat der verwendeten Kathoden sowohl in der Art des Materials als auch in dessen Dicke konstant gehalten.

Somit wird der Einzelblattstapelbildungsprozess mit der resultierenden Stapelgenauigkeit in Abhängigkeit der folgenden Aspekte experimentell untersucht:

- die Längen und Breitenmaße der Kathodenblätter,
- die Ebenheitsabweichungen der Kathodenblätter,
- die Art des Beschichtungsmaterialsystems der Kathodenblätter,
- die Dichte der Beschichtung,
- die Massenbeladung der Kathodenblätter.

Die konkrete Ausprägung der aufgeführten Parameter wird an der jeweils relevanten Stelle in der Arbeit vorgestellt. Eine besondere Bedeutung besitzen jedoch die Ebenheitsabweichungen. Während die weiteren Parameter zwar toleranzbehaftet sind, aber trotzdem gezielt eingestellt werden können, sind die Ebenheitsabweichungen der Kathode ein in der Literatur kaum untersuchter und nicht verstandener Strukturparameter. Insbesondere die Kalandrierung mit der dort auftretenden prozessinhärenten Welligkeit lässt jedoch einen Einfluss auf die Ebenheit des Kathodenblatts und somit auch einen Einfluss auf die Stapelgenauigkeit erwarten.

Aus diesem Grund werden in Kapitel 5 die geometrischen Ebenheitsabweichungen detailliert experimentell untersucht. In Kapitel 6 folgt dann die Untersuchung der Einzelblattstapelbildung und der resultierenden Stapelgenauigkeit auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 5.

5 Geometrische Charakterisierung der Einzelblattelektroden

Als wichtiges Halbzeug der Einzelblattstapelbildung ist das vereinzelt Elektrodenblatt zu sehen, dessen Geometrie von entscheidender Bedeutung für die resultierende Stapelgenauigkeit ist. Insbesondere die Kalandrierung mit den auftretenden Welligkeiten im Kathodencoil und deren Fortpflanzung in das vereinzelt Kathodenblatt stehen hierbei im Fokus. Aus diesem Grund werden im Folgenden die bei der Kalandrierung auftretenden Rand- und Mittwellen quantifiziert und deren Einfluss auf die Geometrie des Kathodenblatts untersucht, s. Abbildung 5-1.

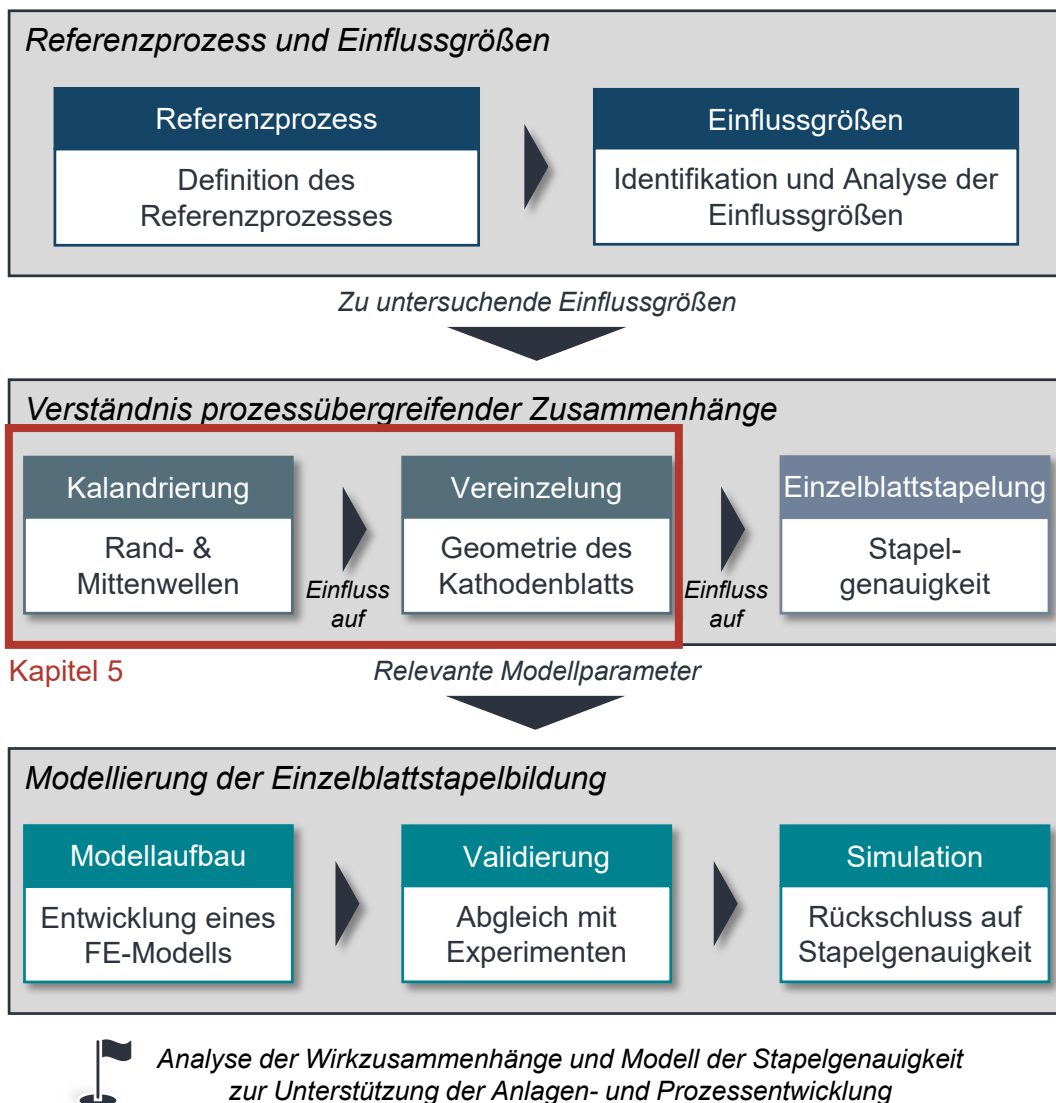


Abbildung 5-1: Einordnung von Kapitel 5 in das Zielbild der Arbeit

In Kapitel 5.1 werden zunächst die allgemeinen geometrischen Effekte in Einzelblattelektroden analysiert und diskutiert. In Kapitel 5.2 wird das experimentelle Vorgehen dargelegt. Die Kalandrierergebnisse mit Fokus auf den Rand- und Mittenwellen werden in Kapitel 5.3 diskutiert und in Kapitel 5.4 abschließend deren Auswirkungen auf die resultierende Geometrie der vereinzelt Kathodenblätter. Die Ergebnisse in den Kapitelabschnitten beruhen dabei auf den drei Veröffentlichungen des Autors (Mayer & Fleischer 2021; Mayer & Schwab et al. 2023; Mayer & Wurba et al. 2021) sowie auf den angeleiteten Abschlussarbeiten (A_Schwab 2022) und (A_Wang 2021).

5.1 Geometrische Effekte in Einzelblattelektroden

Die Geometrie der Einzelblattelektroden lässt sich prinzipiell in die beiden Aspekte Abmaße des Zuschnitts, also Längen- und Breitenmaße, sowie Unebenheiten des Blattes bei Ablage auf eine ebene Fläche unterteilen. Beide Aspekte überlagern sich im vereinzelt Elektrodenblatt. Bei den Abmaßen des Zuschnittes ist klar ersichtlich, dass sich diese direkt auf die Stapelgenauigkeit auswirken. Hinsichtlich der Unebenheiten im Einzelblatt stellt sich zunächst die Frage des Ursprungs dieser und ob der Einfluss der Unebenheiten den Prozess der Stapelbildung beeinflusst. Im Detail werden in Kapitel 5.1.1 die Längen- und Breitenabweichungen diskutiert und in Kapitel 5.1.2 die Unebenheiten im Elektrodenblatt.

5.1.1 Längen- und Breitenabweichungen

Nach (Weinmann 2022, S. 100) beschreibt der Zuschnitt der Elektroden das untere Limit der Stapelgenauigkeit, die theoretisch erreicht werden könnte, wenn alle anderen Einflussfaktoren keinen Einfluss hätten. Die Längen- und Breitenabmaße der Elektroden werden je nach Fertigungsprozess in einem oder in mehreren Vereinzlungsschritten eingestellt, die in Abbildung 5-2 dargestellt sind.

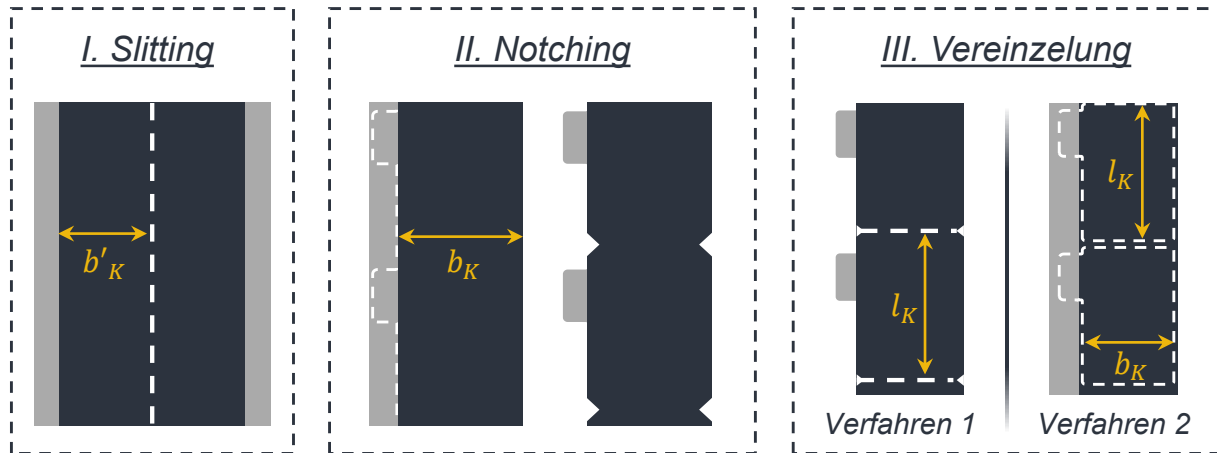


Abbildung 5-2: Prozessschritte in der Batteriezellfertigung mit konstituierendem Einfluss auf die Einzelblattbreite b_K und die Einzelblattlänge l_K

Im industriellen Maßstab werden die Elektrodencoils beim Slitting zunächst längs in Laufrichtung konfektioniert. Hier wird das Muttercoil der Elektrode in Laufrichtung in zwei bzw. je nach Beschichtungsbahnen variierende Anzahl an Tochtercoils vereinzelt. Dabei wird eine Längsseite des späteren Einzelblatts b'_K konstituiert. Im Zusammenspiel mit dem nachfolgendem Notching, also dem Heraustrennen des Ableiterfährchens, wird die finale Breite b_K des späteren Einzelblatts definiert. Anschließend werden die Elektrodenblätter aus den Coils konfektioniert, wodurch die finale Länge l_K eingestellt wird. Darüber hinaus kann das Elektrodenblatt auch direkt aus der Elektrodenbahn beispielsweise mittels Bandstahlschnitt, einem Laser oder einem Feinstanzwerkzeug herausgetrennt werden (Jansen & Kandula et al. 2020; Mayer & Wurba et al. 2021). Das direkte Heraustrennen hat jedoch unabhängig des genutzten Werkzeugs die Folge, dass prinzipbedingt mehr Verschnitt im beschichteten Bereich durch einen verbleibenden Gitterrand produziert wird, was im Labormaßstab toleriert werden kann. In Großserie muss jedoch das Ziel sein, jeden Verschnitt zu minimieren, weswegen die Vereinzelung in die beschriebenen Prozessschritte aufgespalten wird. Im industriellen Maßstab werden die Maße des Elektrodenblatts somit von bis zu drei Prozessschritten eingestellt, im Labormaßstab meistens nur von einem Prozessschritt.

(Weinmann 2022, S. 38–39) gibt sowohl für die Länge als auch für die Breite der Elektrodenblätter eine Genauigkeit von $\pm 0,2$ bis $\pm 0,3$ mm an, die technologieunabhängig in der heutigen Fertigung erreicht werden kann. (Kollenda & Hussein et al. 2023) zeigen Längenabweichungen von bis zu $\pm 0,375$ mm.

Im Vergleich zur heute erzielbaren Präzision von Fertigungskinetiken erscheinen die Toleranzen für die Schneidprozesse relativ hoch, was den Einfluss des zu verarbeitenden Materials in den Vordergrund rückt. Insbesondere die in Kapitel 2.2.2.2 aufgeführten Effekte im Bahnmaterial nach der Kalandrierung führen zu erschwerten Bedingungen bei der Bahnführung sowie dem Aufrechterhalten einer homogenen Bahnspannung. Hinzu kommen auch die Auswirkungen des in Kapitel 2.2.3 diskutierten Camber-effekts, wodurch sich nach dem Slitting in der Elektrodenbahn eine Krümmung einstellt, die sich ebenso negativ auf die Genauigkeit in der Vereinzelung auswirken kann. Diese Effekte können auch dazu führen, dass sich trotz rechteckigem Nennmaß beispielsweise trapezförmige Grundformen oder ausbauchende Kanten im Elektrodenblatt einstellen können.

5.1.2 Unebenheiten im Elektrodenblatt

Die Vorbehandlung des Materials bewirkt nicht nur Längen- und Breitenabweichungen des Einzelblattes, sondern führt ebenfalls zu Unebenheiten in den Einzelblättern. (Mayer & Fleischer 2021) klassifizieren die Unebenheiten in Welligkeiten der Elektrodenblätter in Laufrichtung, Randwellen am Übergang der Beschichtung zum unbeschichteten Substrat, Krümmung der Elektrode über die gesamte Blattlänge sowie zufällig verteilte Unebenheiten. Im vereinzelt Elektrodenblatt können sich diese Effekte überlagern. In Abbildung 5-3 werden die Unebenheiten exemplarisch dargestellt.

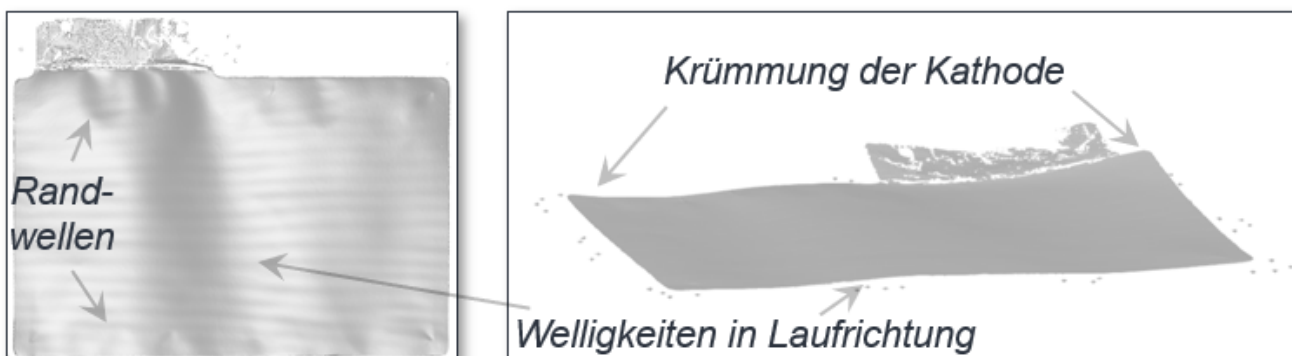


Abbildung 5-3: 3D-Scan exemplarischer Kathodeneinzelblätter

Zur Analyse der Ursachen der geometrischen Effekte in den vereinzelt Elektrodenblättern müssen die vorhergehenden Prozessschritte einbezogen werden.

Die Randwellen sowie die Welligkeiten in Laufrichtung in den Einzelblättern lassen sich auf die Kalandrierung zurückführen (Mayer & Wurba et al. 2021). Während der Kalandrierung wird der beschichtete Bereich der Elektrode durch die hohe Linienlast gelängt.

(Schreiner 2023, S. 24) spricht hierbei von ca. 0,5 % Längung bei der Kalandrierung mit temperierten Walzen und ca. 0,75 % Längung bei Walzen mit Raumtemperatur. Die Längung des beschichteten Bereichs bewirkt die Bildung von Rand- und Mittenwellen, deren Ursache in Kapitel 2.2.2.2 beschrieben wird.

Abbildung 5-3 zeigt, dass sich beide Wellentypen durchaus in das Einzelblatt übertragen können, insbesondere die Randwellen sind deutlich zu sehen. Im Gegensatz zur Kalandrierung ist der unbeschichtete Rand allerdings bis auf das Ableiterföhnchen entfernt worden, der für die Wellenbildung hauptursächlich ist. Es ist somit anzunehmen, dass eine Reduktion der Wellen zu erwarten ist. Da sowohl Rand- als auch Mittenwellen im Einzelblatt jedoch weiter zu sehen sind, ist davon auszugehen, dass die Wellen nicht nur auf einer elastischen, sondern auch auf einer plastischen Verformung basieren.

Als weiteren Effekt lässt sich eine Krümmung über die gesamte Länge des Einzelelektrodenblatts beobachten, was durch das Aufwickeln der Elektrodenbahn nach der Kalandrierung induziert wird (Mayer & Wurba et al. 2021). Analog zur Verarbeitung von Blechbändern kann von einem abwickelbaren Planheitsfehler gesprochen werden (Behrens & Nadi et al. 2009). Abwickelbare Planheitsfehler sind so definiert, dass sich das Blech bzw. im vorliegenden Fall die Elektrode nur um eine Achse krümmt (Behrens & Nadi et al. 2009). Dies äußert sich als Bandkrümmung des Coils und pflanzt sich als Krümmung in die vereinzelte Elektrode fort. Die Ursache hierfür liegt im Aufwickelprozess der Elektrode auf das Coil. In der oberen Beschichtung werden Zugspannungen induziert, während in der unteren Beschichtung Druckspannungen eingebracht werden. Aufgrund des eingesetzten Binders in der Kathodenbeschichtung, wofür häufig Polyvinylidenfluorid (PVDF) verwendet wird (Sung & Kim et al. 2020), besitzt die Beschichtung zusätzlich ein viskoelastisches Materialverhalten (Gupta & Üçel et al. 2020). Die aufgetragenen Spannungen in der Beschichtung relaxieren somit über die Dauer der Aufwicklung und verstärken die Krümmung, was ein typisches Verhalten für viskoelastische Materialien darstellt, s. (Gross & Hauger et al. 2023, S. 330).

Weiterhin ist zu erwarten, dass sich die Krümmung der Elektrode durch den Einfluss der Alufolie verstärkt. In Abhängigkeit der Kalandrierintensität werden die Aktivmaterialpartikel bis zu 2 μm in die Alufolie gedrückt, sodass eine Art „Golfballmuster“ entsteht (Zhang & Huang et al. 2022). Die Eindrücke wirken wie viele kleine Kerben, in denen die Spannung durch die Aufwicklung überhöht wird und sich dadurch auch plastische Verformungen im Substrat entsprechend der Coilform ausbilden können. Je nach aktuellem Radius des Coils variieren die induzierten Spannungen. Auch (Tao & Liang et al.

2021) zeigen, dass bei der Elektrodenaufwicklung nach der Kalandrierung der Einfluss der Partikeleindrücke berücksichtigt werden muss.

Es ist anzumerken, dass die Elektrodenbahn bei der Vereinzelung durch die Coilabwicklung und die Führung über die Umlenkrollen eine Art Richtvorgang erfährt. Insbesondere aufgrund des viskoelastischen Materialverhaltens der Beschichtung ist allerdings zu erwarten, dass die Zeit für ein Richtvorgang bei der Bahnlaufgeschwindigkeit nicht ausreichend ist. Auch wird angestrebt den Radius der Umlenkrollen so groß wie möglich auszuführen, damit keine Beschädigung des Aktivmaterials aufgrund der Biegebelastung auftritt, was dem Richtvorgang zwar entgegensteht, aber höher priorisiert werden muss.

Abschließend verbleiben die Ursachen der zufälligen Unebenheiten. Diese liegen darin begründet, dass die Prozesse der Elektrodenfertigung toleranzbehaftet sind (Thomitzek & Schmidt et al. 2021). Generell sind Prozessschwankungen aufgrund von Toleranzen ein wiederkehrendes Problem, worauf aber in dieser Arbeit nicht der Fokus gelegt werden soll und daher hierfür keine detailliertere Auseinandersetzung erfolgt.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass in der Geometrie des Einzelelektrodenblattes durch die vorgelagerten Prozesse starke Schwankungen auftreten können. Während Angaben zu Längen- und Breitenabmaßen der Elektrodenblätter zu finden sowie deren Ursachen verstanden sind, sind die Ursachen der Unebenheiten in den Elektrodenblätter zwar erkannt, aber noch nicht quantifiziert worden. Die Analyse zeigt, dass die Kalandrierung mit der dort auftretenden Materialveränderung sowie den charakteristischen Welligkeiten einen maßgeblichen Einfluss auf die Geometrie des Einzelblattes besitzen kann. Erste Ansätze zur geometrischen Quantifizierung der Welligkeiten in der Kalandrierung lassen sich zwar in der Literatur finden, beispielsweise in (Bold 2023, S. 114–115; Günther 2023, S. 118–126; Mayr & Schreiner et al. 2022), allerdings führen die Vielzahl an Struktur- und Prozessparameter sowie unterschiedliche Anlagen dazu, dass die Ergebnisse zur Untersuchung der Welligkeiten im Kathodeneinzelblatt nicht übertragen werden können. Aus diesem Grund werden im Folgenden zunächst die auftretenden geometrischen Welligkeiten bei der Kalandrierung und anschließend deren Auswirkungen auf die geometrische Form des vereinzelt Kathodenblatts untersucht.

5.2 Experimentelles Vorgehen

Zur Quantifizierung des Kalandriereinflusses auf die Geometrie der Einzelkathodenblätter sind zunächst systematische Kalandrierversuche und deren Charakterisierung erforderlich. Aus den kalandrierten Kathodenbahnen müssen anschließend Kathodenblätter vereinzelt werden, die wiederum charakterisiert werden müssen. Der Fokus liegt auf der Analyse der Geometrie, sodass die Form der Welligkeiten nach der Kalandrierung und die Form der Kathodenblätter erfasst und ausgewertet werden. Kapitel 5.2 beschreibt das hierzu notwendige Vorgehen. Zunächst werden die Zielgrößen definiert, anhand derer die Versuchsdurchführung und notwendige Anlagen- und Messtechnik abgeleitet werden, s. Kapitel 5.2.1 und 5.2.2. Anschließend werden die Einflussfaktoren und deren Faktorstufen definiert und abschließend der Versuchsplan aufgestellt, s. Kapitel 5.2.3 und 5.2.4.

5.2.1 Zielgrößen

Zur Beurteilung des Einflusses der Kalandrierung auf die Welligkeit der Kathodenbahn nach der Verdichtung eignen sich nach (Mayr & Schreiner et al. 2022) und (Bold 2023, S. 113–116) zwei Zielgrößen. Einerseits kann die Welligkeit anhand der Amplitudengröße quantifiziert werden. (Mayr & Schreiner et al. 2022) führen hierzu die Kennzahl „Defect Evaluation Index“ (DEI) ein. Diese beschreibt für eine Schnittkurve der Kathode $z_{K,y}(x)$ an einer Stelle y in einem definierten Bereich $[a, b]$ von x , also in Laufrichtung der Kathode, die Differenz zwischen $\min(z_{K,y}(x))$ und $\max(z_{K,y}(x))$ und kann mit Formel 5-1 formalisiert werden. Die Definition des Koordinatensystems kann Abbildung 5-4 entnommen werden.

$$DEI_y = \max(z_{K,y}(x)) - \min(z_{K,y}(x)) \quad \text{Formel 5-1}$$

mit $x \in [a, b]$

Der DEI_y lässt sich je nach ausgewerteter Schnittkurve sowohl für die Mittenwellen DEI_M als auch für die Randwellen DEI_R verwenden, s. Abbildung 5-4.

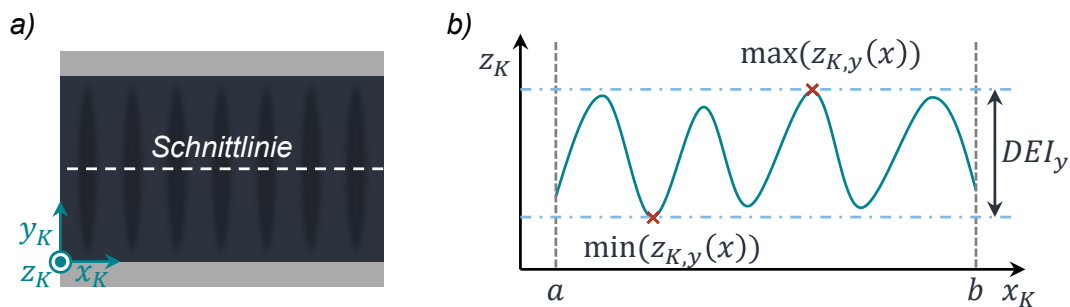


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung einer kalandrierten Kathode mit Wellen und Schnittlinie in a) und schematische Auswertung des DEI_y anhand der Schnittlinie in b)

Andererseits kann in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023) und (Bold 2023, S. 113–114) als weitere Kennzahl die Anzahl der Mittenwellen $n_{W,M}$ sowie die Anzahl der Randwellen $n_{W,R}$ für einen definierten Bereich in y -Richtung nach der Kalandrierung ausgewertet werden.

Vorversuche zeigen, dass die Auswertung der Wellenanzahl bei der Untersuchung der Einzelblattelektroden nicht zielführend ist (A_Wang 2021, S. 37–40). Ebenso ist der DEI_y ein spezifischer Kennwert für die Elektrode nach der Kalandrierung. Vielmehr zeigt sich jedoch, dass sich zur Charakterisierung der vereinzelter Kathodenblätter die Auswertung der Schnittlinien des Einzelblattes $z_{E,y}(x)$ in x -Richtung an unterschiedlichen y -Werten eignet, wenn diese flach auf einem Tisch liegen. Die Schnittlinien werden mittels deren qualitativen Verlaufs diskutiert und durch die jeweilige maximale Erhebung $\max(z_{E,y}(x))$ und deren Position $x_{E,y,max}$ ausgewertet. Exemplarisch ist dies in Abbildung 5-5 dargestellt. Für die spätere Auswertung werden die Schnittlinien an unterschiedlichen y -Werten ausgewertet sowie die Ablageseite des Kathodenblatts berücksichtigt, worauf in der jeweiligen Auswertung aber nochmal genauer eingegangen wird.

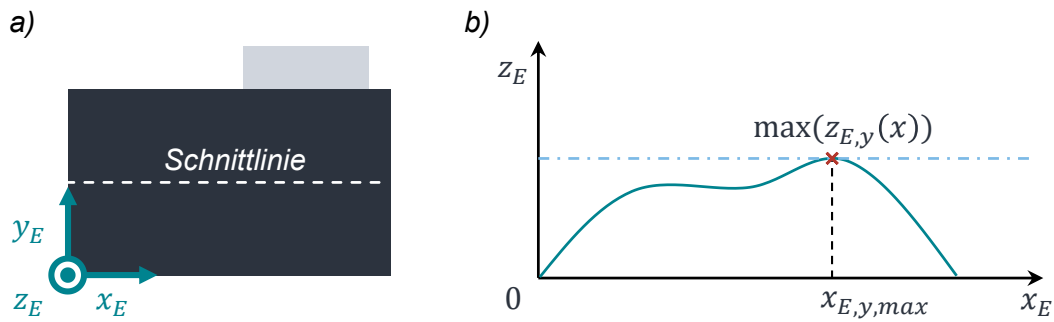


Abbildung 5-5: Schematische Darstellung eines Einzelblatts in a) und schematische Auswertung der Schnittlinie des Einzelblatts $z_{E,y}(x)$ anhand der Position $x_{E,y,max}$ und des Maximums $\max(z_{E,y}(x))$ in b)

Längen- und Breitenmaße der Kathodenblätter werden in den Untersuchungen nicht ausgewertet, da während der Vereinzelung bedingt durch die vorhandene Anlagentechnik keine Bahnzugspannung auf das Blatt aufgebracht werden kann. Ein Vergleich an dieser Stelle wäre somit nicht zielführend. Zudem finden sich Wertebereiche zu typischen Längen- und Breitenmaßabweichungen in der Literatur, s. beispielsweise (Kollenda & Hussein et al. 2023; Weinmann 2022, S. 38–39). Ebenso sind diese Maße auch Parameter, die in einem Simulationsmodell zu berücksichtigen sind und deren Einfluss durch Simulationsstudien abgeschätzt werden kann. Zur besseren Übersicht finden sich die Zielgrößen in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Zielgrößen zur Untersuchung der Welligkeit nach der Kalandrierung und der Unebenheiten im Einzelblatt

Zielgrößen	Einheit	Beschreibung des Parameters
DEI_M	mm	Defect Evaluation Index der Mittenwellen
DEI_R	mm	Defect Evaluation Index der Randwellen
$n_{W,M}$	Stück/mm	Normierte Anzahl der Mittenwellen nach der Kalandrierung
$n_{W,R}$	Stück/mm	Normierte Anzahl der Randwellen nach der Kalandrierung
$\max(z_{E,y}(x))$	mm	Maximum der Schnittlinie $z_{E,y}(x)$ des Einzelblatts in y_E
$x_{E,y,max}$	mm	Position des Maximums der Schnittlinie in x -Richtung

5.2.2 Versuchsablauf, Anlagentechnik und Messsystem

Zur Erarbeitung der notwendigen Datengrundlage ist der Versuchsablauf auf Basis der vorhandenen Anlagen- und Messtechnik in Abbildung 5-6 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben.

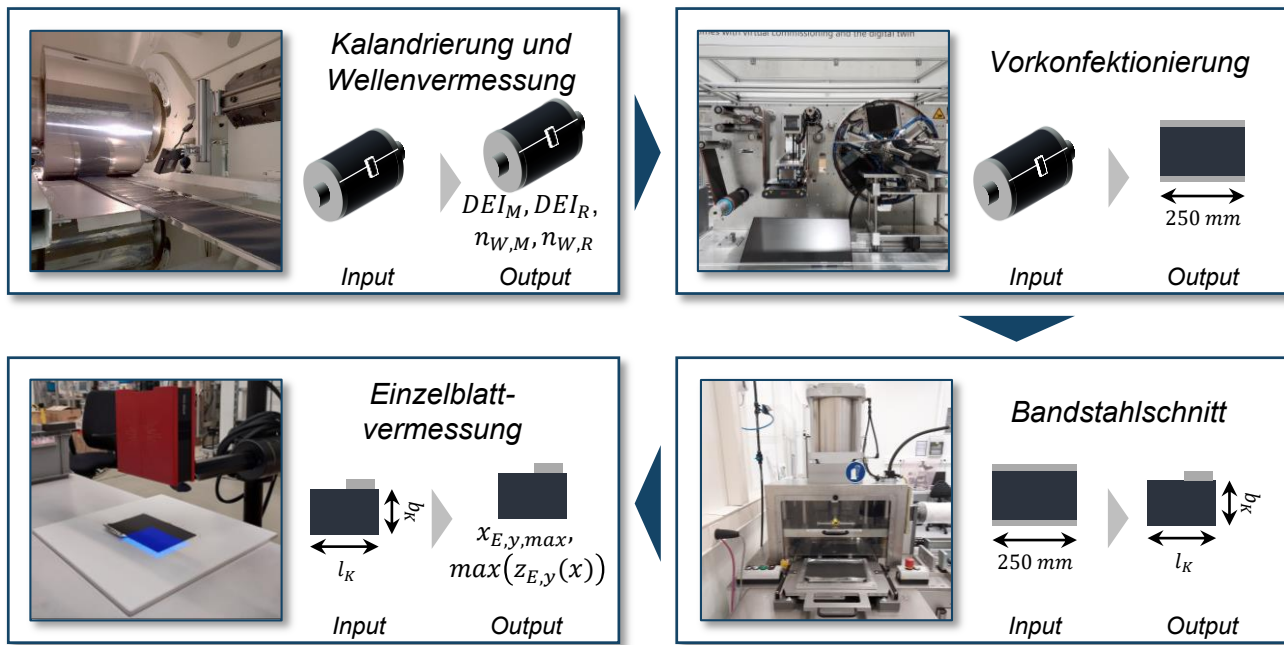


Abbildung 5-6: Versuchsablauf zur Untersuchung der kalandrierten Kathoden sowie der vereinzelt Kathodenblätter in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)

5.2.2.1 Kalandrierung und Wellenvermessung

Für jeden Versuchslauf werden initial etwa 3 m Elektrodenmaterial kalandriert. Hierzu wird ein **Kalander** der Baureihe GKL 500 MS der Firma Saueressig GmbH + Co. KG, die heute zur Matthews International GmbH gehört, verwendet. Die Walzen des Glättwerks haben einen Durchmesser von 700 mm, eine Breite von 500 mm und können bis auf 95°C temperiert werden. Die maximal bearbeitbare Beschichtungsbreite beträgt 350 mm bei einer maximalen Folienbreite von 400 mm. Durch die Walzen kann eine maximale Linienlast von 2000 N mm⁻¹ aufgebracht werden. Da es sich um einen Kalander für Forschungsaufgaben handelt, besitzen die Walzen keinen Bombagenschliff für ein bestimmtes Elektrodenformat, sondern sind parallel geschliffen. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit lässt sich zwischen 1 und 30 m min⁻¹ einstellen. Zur Aufrechterhaltung des Bahnzugs lassen sich beim Abwickler des Ausgangsmaterials 20 bis 150 N einstellen, beim Aufwickler des kalandrierten Materials 50 bis 250 N. (SAUERESSIG GmbH + Co. KG 2013)

Nach der Kalandrierung von etwa 3 m Kathodenmaterial wird der Kalandrierer gestoppt, die Spannung in der Kathodenbahn aber aufrechterhalten. Zur Aufnahme der 3D-Strukturen der Kathode nach der Kalandrierung wird das Messgerät **GOM ATOS Core 135** der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH verwendet. Das Stereokamerasystem besitzt zwei Kameraobjektive und ein Projektorobjektiv, das blaue Strahlung im Bereich von 400-500 nm emittiert. Das Messvolumen der 135er-Baureihe beträgt 135 mm x 100 mm x 100 mm. Für größere Messbereiche besteht die Möglichkeit, mehrere Messungen miteinander zu verbinden, das sog. Stitching. In der vorliegenden Arbeit werden hierzu in den einzelnen Messaufnahmen Referenzpunkte platziert und in der Messaufnahme mit aufgenommen. Die Software erkennt den jeweiligen Referenzpunkt anhand der Lage. Zur eindeutigen Identifikation müssen mindestens drei Referenzpunkte innerhalb einer Messung aufgenommen werden. Hierdurch ist deren Position innerhalb einer Messung eindeutig, worüber mehrere Messungen bzw. die Punktwolken nahtlos übereinandergelegt werden können. Zur Auswertung der Messungen wird die zugehörige GOM Inspect Software 2022 verwendet. Die kalibrierte Messgenauigkeit des Messsystems wird mit $\pm 0,0045$ mm angegeben. (GOM mbH 2013)

Entsprechend werden GOM-Referenzpunkte etwa 1,5 m nach dem Walzenspalt auf einen etwa 350 mm langen Abschnitt der eingespannten Kathodenbahn appliziert. Dieser Abschnitt wird anschließend mit dem GOM-Messgerät aufgenommen, s. Abbildung 5-7. Wichtig ist hierbei die Aufrechterhaltung des Bahnzugs während der Messung, um die Durchhängung des Materials zu minimieren, was einen Fehler in die Auswertung induzieren würde.

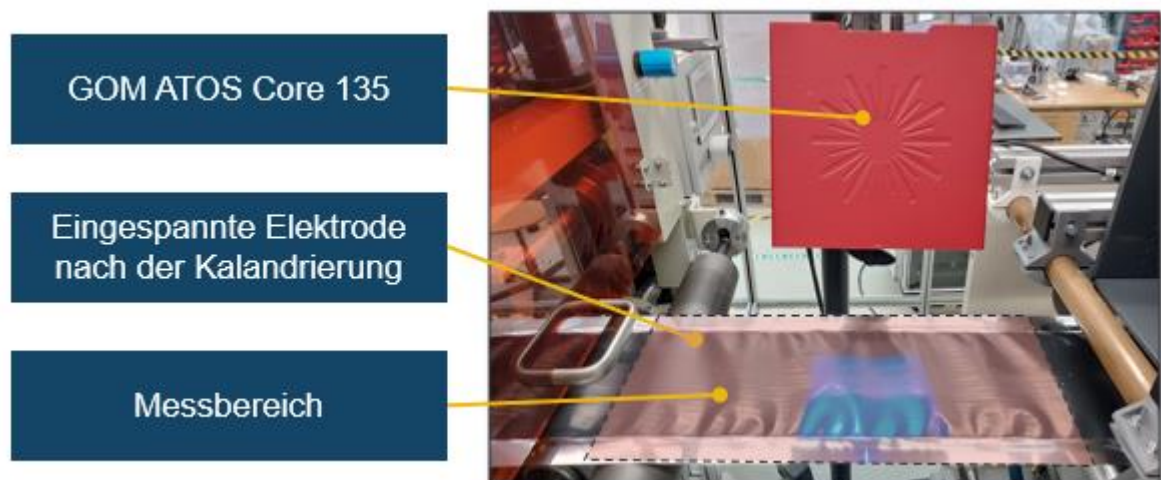


Abbildung 5-7: Messaufbau zur Vermessung der Welligkeit nach der Kalandrierung in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)

Nach der Aufnahme wird die kalandrierte Elektrode auf einen Coilkern mit 6 Zoll Durchmesser, umgerechnet 152,4 mm, aufgewickelt. Jeder Coilkern wurde dabei mit nur wenigen Wicklungen bewickelt, sodass der Coildurchmesser in etwa auch als Aufwickelradius angenommen werden kann. Es ist anzumerken, dass für die Verdichtungsstufe 30 % bzw. 35 % die letzte Umlenkrolle übersprungen werden musste, um Bahnrisse zu vermeiden. Nach der Aufwicklung wurden die Elektrodencoils in einem Pouchbag unter Stickstoffatmosphäre bis zur Weiterverarbeitung gelagert, um Alterungseffekte durch die Atmosphäre zu minimieren.

5.2.2.2 Vorkonfektionierung

Im Anschluss an die Kalandrierung werden die Kathodencoils in einem zweistufigen Verfahren vereinzelt. Zunächst werden die Coils in etwa 250 mm lange Elektrodenblätter vorkonfektioniert, wofür die **Coil2Stack-Anlage** verwendet wird, welche im Rahmen der Dissertation von Weinmann aufgebaut wurde (Weinmann 2022, S. 167–168). Das Verfahren wurde erstmals in (Weinmann & Töpfer et al. 2020) vorgestellt. Die Elektrode wird als Coil in die Anlage eingespannt und in Summe über zehn Umlenkrollen sowie einen Drehrahmen geführt. Anschließend wird die Elektrode von drei Vakuumgreifern gehalten und abgewickelt. Der Bahnzug beträgt 15 N und wird mittels eines Tänzers aktiv geregelt. Gleichzeitig wird die Elektrode mittels Rundmesser, die an den Vakuumgreifern angebracht sind, vereinzelt und das Elektrodenblatt abgelegt. Durch die Umlenkrollen erfährt die Kathode eine Wechselbiegung, wodurch anzunehmen ist, dass das Material eine Art Richtprozess erfährt. Da die Verarbeitung des Materials, das zu 30 bzw. 35 % verdichtet wurde, ohne Bahnrisse nicht möglich war, wurden diese Elektroden manuell zugeschnitten. Die Schwierigkeiten in der Verarbeitung hochverdichteter Elektroden werden bereits in (Günther & Schreiner et al. 2019) dargelegt und können bestätigt werden.

5.2.2.3 Bandstahlschnitt und Einzelblattvermessung

Die Vereinzelung der finalen Geometrie aus den vorkonfektionierten Elektrodenblättern wird mittels **Bandstahlschnittverfahren** durchgeführt. Hierfür wird eine pneumatisch aktuierte Presse der Firma Manz AG verwendet. In die Presse werden je nach Formwunsch Bandstahlschnittwerkzeuge der Firma Karl Marbach GmbH & Co. KG eingelegt, mithilfe derer die finalen Elektrodenblätter ausgestanzt werden. Die Werkzeuge bestehen aus einer Trägerplatte aus Holz, in die geschliffene Bandstahlelemente mit

der Randkontur der gewünschten Elektrodenform zwischen zwei Gummilippen eingelassen werden. Die Anlage sowie das Werkzeug finden sich in Abbildung 5-8.

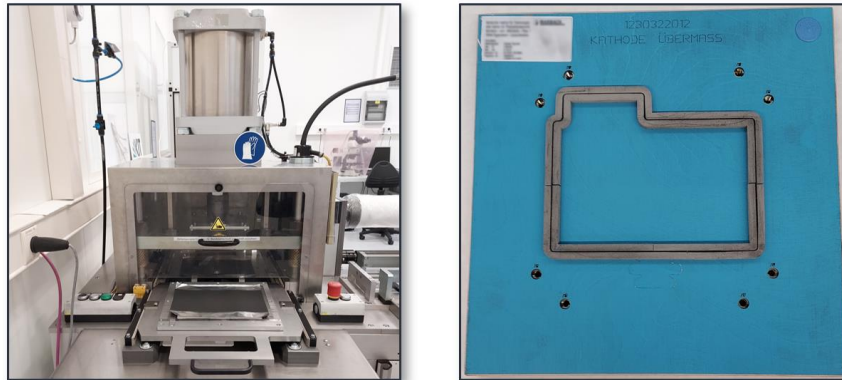


Abbildung 5-8: Bandstahlschnittanlage (links) und zugehöriges Bandstahlschnittwerkzeug (rechts)

Für jede Versuchsreihe werden die vorkonfektionierten Kathoden zu Einzelblattelektroden vereinzelt und bis zur Vermessung unter Stickstoffatmosphäre gelagert. Nach der Vereinzlung werden die Einzelblattelektroden mit dem bereits beschriebenen Messgerät **GOM ATOS Core 135** vermessen. Hierzu werden die Blätter auf eine flache Platte gelegt, auf die GOM-Referenzpunkte appliziert wurden. Anschließend wird das Kathodenblatt mittels mehrerer Einzelmessungen aufgenommen, s. Abbildung 5-9.

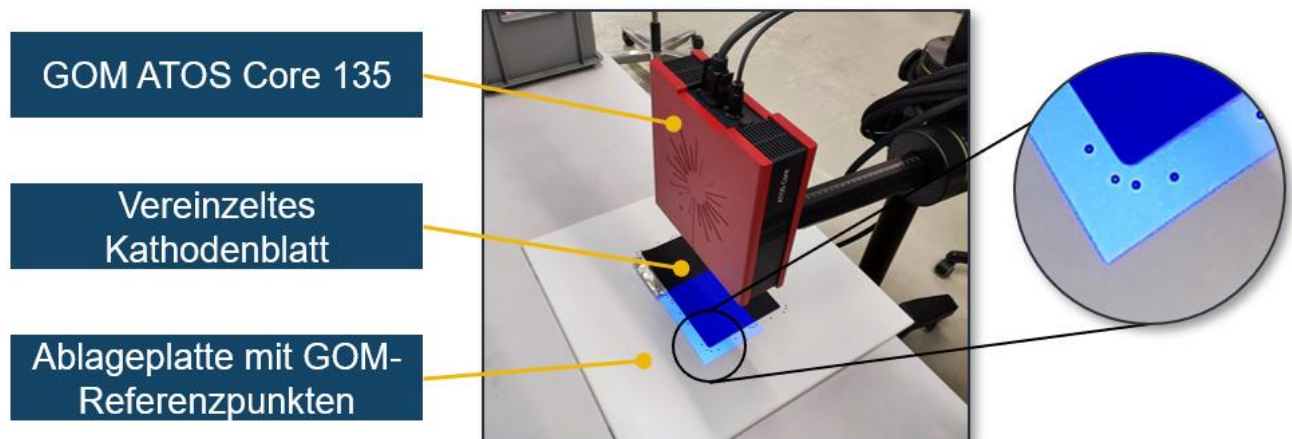


Abbildung 5-9: Messaufbau zur Vermessung der Kathodeneinzelblattgeometrie in Anlehnung an (A_Wang 2021, S. 36)

Wie bei den Messungen nach der Kalandrierung werden auch die Messungen der Einzelblätter mit der GOM Inspect Software 2022 entsprechend der definierten Zielgrößen ausgewertet.

5.2.3 Untersuchte Einflussfaktoren und Faktorstufen

Entsprechend der vorhergehenden Analyse soll der Einfluss der Kalandrierung auf die Unebenheit des vereinzelt Kathodenblatts untersucht werden. Hierfür müssen zunächst die Einflussfaktoren und deren Faktorstufen definiert werden, die zur Untersuchung der Zielgrößen variiert werden sollen. In Kapitel 5.2.3.1 werden die verwendeten Materialsysteme und zugehörigen Strukturparameter und in Kapitel 5.2.3.2 die eingestellten Prozessparameter bei der Kalandrierung vorgestellt und die entsprechenden Faktorstufen diskutiert.

5.2.3.1 Auswahl der Materialsysteme

Hinsichtlich des **Aktivmaterials** existieren verschiedene Materialsysteme mit jeweiligen Vor- und Nachteilen. Bei der Betrachtung der eingesetzten Materialsysteme im Automobilbereich zeigt sich, dass NMC im Zeitraum von 2016 bis 2021 mit über 50 % Marktanteil die am stärksten vertretende Materialgruppe war (Link & Neef et al. 2023). Für 2022 betitelt eine Studie der International Energy Agency den Marktanteil sogar auf 60 % (International Energy Agency 2023)¹¹. Bei den jeweiligen Anteilen von Nickel, Mangan und Cobalt finden sich derzeit verschiedene Rezepturen im Einsatz. Für die nähere Zukunft zeichnet es sich allerdings ab, dass NMC622 und NMC811 aufgrund der geringen Kosten sowie der hohen gravimetrischen Energiedichte dominierend sein werden (Houache & Yim et al. 2022). Aus diesem Grund wird sich beim Aktivmaterial für die beiden Aktivmaterialien NMC622 und NMC811 als Faktorstufen entschieden. Die Zusammensetzung des jeweiligen Materialsystems wird für die Vergleichbarkeit konstant gehalten und beinhaltet 96 % Aktivmaterial, 2 % Leitadditive und 2 % PVDF.

Außerdem gilt es, die Menge der Beschichtung pro Substratfläche festzulegen. Grundsätzlich besitzt jedes Aktivmaterial eine spezifische Kapazität (in mAh g⁻¹). Je nach Schichtdicke kann dementsprechend eine Beladungskapazität („areal capacity“) (in mAh cm⁻²) und eine Massenbeladung („mass loading“ oder auch „loading density“) (in mg cm⁻²) der Elektrode angegeben werden, s. beispielsweise (Günter & Wassiliadis 2022; Heubner & Voigt et al. 2021). Da in der vorliegenden Arbeit die geometrischen Eigenschaften der Elektroden und deren mechanisches Verhalten untersucht werden,

¹¹ International Energy Agency (2023), *Global EV Outlook 2023. Catching up with climate ambitions*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries> [12.11.2023].

ist eine elektrochemische Vergleichbarkeit der Elektroden nicht zielführend. Aus diesem Grund wird als weiterer Faktor die **Massenbeladung** m_B gewählt, um eine Vergleichbarkeit zwischen den beiden Materialsysteme zu schaffen. In (Günther 2023, S. 118) wird diese ebenfalls als signifikanter Parameter für die Wellenausprägung beschrieben. Die Massenbeladung lässt sich nach (Haselrieder 2017, S. 108) aus der Beschichtungsdichte ρ_B und der Beschichtungsdicke δ_B berechnen:

$$m_B = \rho_B \cdot \delta_B \quad \text{Formel 5-2}$$

Zur sinnvollen Auslegung der Faktorstufen müssen zunächst typische Beschichtungsdicken und -dichten betrachtet werden. Nach (Link & Neef et al. 2023) befinden sich typische Kathodendicken von Automobilanwendungen über den Zeitraum von 2016 bis 2022 zumeist im Bereich von 100 μm bis 200 μm mit einem arithmetischen Mittelwert von 147,6 μm und einer Standardabweichung von $\pm 34,7 \mu\text{m}$, wobei vereinzelt ab 2019 auch Dicken $>200 \mu\text{m}$ auftreten. Die durchschnittliche Substratdicke liegt nach (Link & Neef et al. 2023) bei 14,7 μm mit einer Standardabweichung von $\pm 3,3 \mu\text{m}$. Für das Aktivmaterial lässt sich daraus schlussfolgern, dass die einseitige Schichtdicke somit etwa im Bereich von 42,65 μm bis 92,65 μm liegt, was auch in etwa mit den Angaben von (Schmuck & Wagner et al. 2018) übereinstimmt, die hierfür einen Korridor von 65 μm bis 85 μm angeben. Ein Beispiel für eine industrielle Anwendung ist der ID3 der Volkswagen AG, dessen NMC-Batteriezellen nach (Günter & Wassiliadis 2022) eine einseitige Schichtdicke der Kathode von 87,25 μm sowie eine Massenbeladung von 27,9 mg cm^{-2} aufweisen. (Wu & Maier et al. 2020) erwarten darüber hinaus für die Zukunft Schichtdicken von bis zu 150 μm .

Hinsichtlich der Dichte der Aktivmaterialien ordnen (Kwade & Haselrieder et al. 2018) typische Werte für NMC-Kathoden vor der Kalandrierung zwischen 2,2 g cm^{-3} bis 2,6 g cm^{-3} ein.

Auf Basis der diskutierten Schichtdicken und -dichten werden für die Massenbeladung (beidseitig) die beiden Faktorstufen 41,6 mg cm^{-2} und 55,0 mg cm^{-2} definiert. Für die Aluminiumfolie wird eine Dicke von 15 μm festgelegt. Zur Sicherstellung der Verarbeitbarkeit an der vorhandenen Anlagentechnik wird die Aluminiumfolie auf eine Breite von 215 mm und eine Beschichtungsbreite von 155 mm definiert.

Auf Basis der Vorüberlegungen werden die Kathoden von der Firma EnerTech International, Inc. beschafft. Für NMC622 wird seitens des Herstellers eine Partikelgröße von

12 μm , für NMC811 werden 10 μm angegeben. Hierbei handelt es sich jeweils um den Perzentilwert d_{50} , es sind also jeweils 50 % der Partikel größer bzw. kleiner. Das Material wird als Coilware geliefert und ist beidseitig beschichtet. Zusammenfassend finden sich die Materialdaten in Tabelle 5-2. In Summe ergeben sich vier zu untersuchende Materialkombinationen.

Tabelle 5-2: Materialkonfigurationen im unkalandrierten Zustand mit jeweils zwei Aktivmaterialtypen und zwei Massenbeladungen in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)

Aktivmaterial	Beschichtungsdichte in g cm^{-3}	Massenbeladung (beidseitig) in mg cm^{-2}	Beschichtungsdicke in μm	Partikelgröße d_{50} in μm
NMC622	2,4	41,6 \pm 0,5	191 \pm 1	12
NMC622	2,4	55,0 \pm 0,5	242 \pm 1	12
NMC811	2,2	41,6 \pm 0,5	204 \pm 2	10
NMC811	2,2	55,0 \pm 0,5	260 \pm 1	10

5.2.3.2 Auswahl der Prozessparameter für die Kalandrierung

Hinsichtlich der Dichte der Aktivmaterialien nach der Kalandrierung ordnen (Kwade & Haselrieder et al. 2018) typische Werte für NMC-Kathoden zwischen 2,8 g cm^{-3} und 3,4 g cm^{-3} ein. In der Literatur finden sich allerdings auch Untersuchungen, die über diesen Korridor hinaus gehen. So betrachten (Beuse & Fingerle et al. 2021) in ihren Untersuchungen Verdichtungen von NMC622-Kathoden im Bereich von 2,7 g cm^{-3} bis 3,65 g cm^{-3} , (Mayer & Wurba et al. 2021) Verdichtungen von NMC811-Kathoden von 2,3 g cm^{-3} bis 3,3 g cm^{-3} . Da sich die Beschichtungsdichte im Kalandrierprozess jedoch nicht direkt messen lässt und durch die Umrechnung zusätzlich zu den Mess- und Prozesstoleranzen Ungenauigkeiten entstehen, wird als Einflussfaktor bei der Kalandrierung der **Verdichtungsgrad der Beschichtung** Π_B gewählt, der in (Günther 2023, S. 118) auch als signifikanter Parameter für die Wellenbildung identifiziert wird. Auf Basis der diskutierten, typischen Aktivmaterialdichten nach der Kalandrierung werden 15 %, 25 % für beide Materialien sowie 35 % für NMC811 als geeignete Faktorstufen für den Verdichtungsgrad festgelegt. Für NMC622 wird als höchster Verdichtungsgrad 30% gewählt, da in Vorversuchen aufgrund der maximalen Linienlast des Kalenders 35 % nicht erreicht werden konnte.

Der Einfluss des **Bahnzugs** F_K auf die Kalandrierung ist in der Literatur deutlich weniger untersucht als die Verdichtung des Aktivmaterials und wird häufig nicht angegeben.

Es ist anzunehmen, dass der Bahnzug bei den in der Literatur häufig genutzten Laborkalandern keine relevante Rolle spielt. Auch (Günther 2023, S. 121) spricht den Einfluss des Bahnzugs auf die Welligkeit zwar an, konkrete Untersuchungen werden jedoch nicht durchgeführt. Für den hier verwendeten, industrienahen Kalandrierer ist der Bahnzug insbesondere im Hinblick auf die Prozessstabilität eine wichtige Einflussgröße. (Bold 2023, S. 114) zeigt beispielsweise eine starke Abhängigkeit der Wellenfrequenz nach der Kalandrierung in Abhängigkeit des applizierten Bahnzugs, der in den zwei Stützpunkten 1 N und 100 N untersucht wird. Eigene Voruntersuchungen zeigen, dass die Wellenamplituden in Laufrichtung in Abhängigkeit des Bahnzugs einen linearen Zusammenhang aufzeigen, die Amplituden sich jedoch im Vergleich zur Variation des Verdichtungsgrads in absoluten Werten deutlich geringer ausprägen (Mayer & Schwab et al. 2023). Da die Elektrode insbesondere bei einer Verdichtung von 35 % stark belastet wird und das Risiko für Bahnrisse stark ansteigt, werden für die Bahnzugspannung die drei Faktorstufen 10 N, 30 N und 50 N gewählt. Es ist zu erwarten, dass auch in diesem Bereich die zu untersuchenden Effekte sichtbar werden.

Zuzüglich zum Verdichtungsgrad und dem Bahnzug ist anzunehmen, dass die Wellenausprägung auch von der Walzentemperatur beeinflusst wird. (Günther 2023, S. 121) identifiziert bei der Walzentemperatur aufgrund der hohen Streuung zwar keinen signifikanten Einfluss, die Tendenz zeigt jedoch, dass bei höheren Walzentemperaturen die Welligkeiten abnehmen. Dies wird auch bei (Mayr & Schreiner et al. 2022) bestätigt, wo die Erhöhung der Walzentemperatur von 23°C auf 90°C eine Reduktion des DEI_M von 25,2 % ergibt. Da grundsätzlich angestrebt wird, die Welligkeiten in den Elektroden aufgrund der negativen Auswirkungen auf die Folgeprozesse zu minimieren, wird für die vorliegende Arbeit die Walzentemperatur nicht variiert, sondern auf einem konstant hohen Temperaturniveau von 90°C gehalten. Ebenso wird die Kalandrierungsgeschwindigkeit mit 1 m min^{-1} konstant gehalten. Nach der Kalandrierung werden die Kathoden auf Coilkerne mit einem Durchmesser von 6 Zoll aufgewickelt.

5.2.4 Ableitung des Versuchsplans

Auf Basis der analysierten Einflussfaktoren und deren Faktorstufen wird ein vollfaktorielles Versuchsplan entworfen. Bei einem Vollfaktorplan werden alle möglichen Kombinationen der Einflussfaktoren und -stufen getestet (Siebertz & van Bebbler et al. 2017, S. 6). Die Parameter und deren Ausprägungen finden sich zusammengefasst in Tabelle 5-3.

Tabelle 5-3: Untersuchte Einflussfaktoren und deren Ausprägungen

Einflussfaktor	Ausprägung des Einflussfaktors		
	NMC622		NMC811
Aktivmaterial	NMC622		NMC811
Massenbelastung m_B	41,6 mg cm ⁻²		55,0 mg cm ⁻²
Verdichtungsgrad Π_B	15 %	25 %	30 % / 35 %
Bahnzug F_K	10 N	30 N	50 N

Aus den vier Einflussfaktoren und den aufgeführten Faktorstufen ergeben sich für den vollfaktoriellen Versuchsplan in Summe 36 Versuchsdurchläufe. Jede Parameterkonfiguration wird mit einfacher Replikation kalandriert. Aus dem kalandrierten Material werden jeweils zwischen 5 und 10 Einzelblätter vereinzelt, sodass für die Messungen der Einzelblätter eine statistisch repräsentative Replikation vorliegt. Der detaillierte Versuchsplan findet sich im Anhang in Tabelle 0-1 und wurde im Rahmen der angeleiteten Abschlussarbeit (A_Schwab 2022) umgesetzt.

5.3 Analyse der Elektrodenwelligkeit nach der Kalandrierung

Entsprechend den Berichten aus der Literatur zeigen sich die typischen Fehlerbilder in der Elektrode nach der Kalandrierung. Je nach Ausprägung der Parameter sind insbesondere die Randwellen sowie die Mittenwellen deutlich zu beobachten. Exemplarisch ist in Abbildung 5-10 ein Kalandrierexperiment mit den zu beobachtenden Effekten dargestellt.



Abbildung 5-10: Untersuchte Effekte bei der Kalandrierung der NMC-Kathoden

Bei der Kalandrierung der Kathoden mit 30 % bzw. 35 % sind die Effekte derart stark ausgeprägt, dass die letzte Umlenkrolle am Kalandrierer übersprungen werden muss, um Folienrisse zu vermeiden. Zur Quantifizierung werden die Wellen entsprechend der Zielgrößen aus Kapitel 5.2.1 mittels DEI_y charakterisiert. Da zu erwarten ist, dass die Mittenwellen im mittleren Bereich der Kathode am stärksten ausgeprägt sind, wird eine Schnittlinie im Abstand von 80 mm von der Beschichtungskante bei einer Gesamtbeschichtungsbreite von 155 mm ausgewertet. Zur Untersuchung der Randwellen wird eine Schnittlinie mit 5 mm Abstand von der Beschichtungskante in die Kathode gelegt. Zur Berechnung des DEI_y wird in x_K -Richtung ein Bereich von 350 mm definiert. Zusätzlich zum DEI_y wird die Anzahl der Wellen in einem Bereich von 300 mm gezählt. In Abbildung 5-11 ist eine exemplarische Messung der Kathode mittels GOM Atos Core 135 zu sehen.

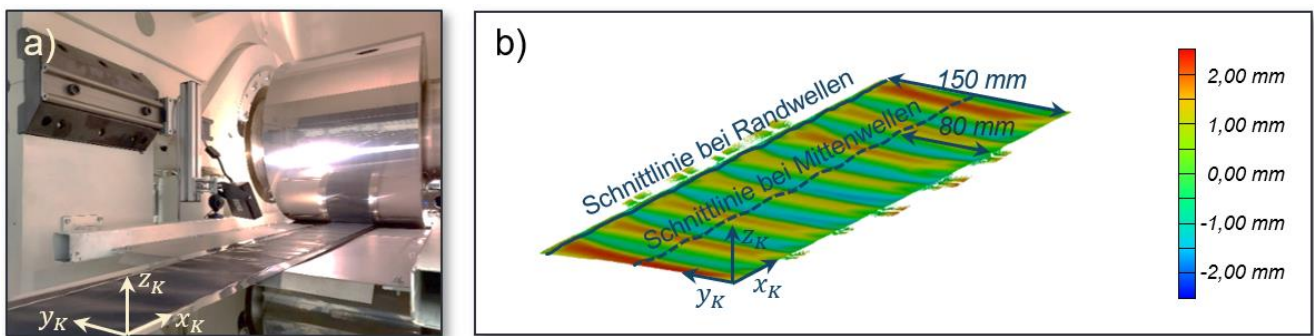


Abbildung 5-11: Kathode nach der Kalandrierung in a) mit exemplarischer Messaufnahme und angedeuteten Schnittlinien für Mittenwellen bei $y_K = 80 \text{ mm}$ und Randwellen bei $y_K = 150 \text{ mm}$ in b)

Zur Quantifizierung und weiteren Analyse der Ergebnisse werden in Kapitel 5.3.1 zunächst die Mittenwellen diskutiert und anschließend in Kapitel 5.3.2 die Randwellen.

5.3.1 Mittenwellen in Maschinenrichtung

Abbildung 5-12 zeigt eine Auswertung der Mittenwellen kalandrierter Kathoden anhand einer exemplarischen Messung. Je nach Parameterkonfiguration sind die Wellen dabei in Amplitude und Wellenlänge verschieden.

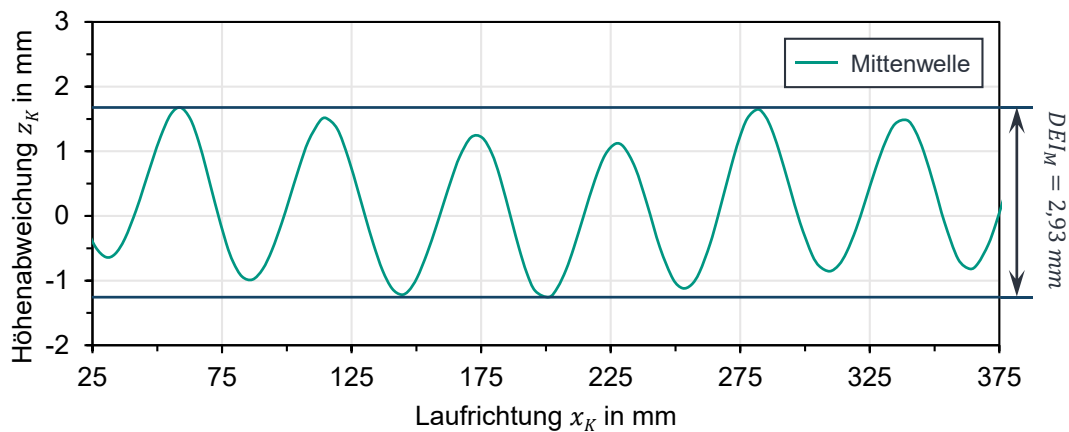


Abbildung 5-12: Exemplarische Berechnung des DEI_M einer gemessenen Mittenwelle nach der Methodik von (Mayr & Schreiner et al. 2022)

Im Folgenden werden die Messungen der Mittenwellen auf Basis des DEI_M diskutiert, s. Kapitel 5.3.1.1 und 5.3.1.2. Anschließend wird die Anzahl der Wellen anhand der auftretenden Maxima ausgewertet, s. Kapitel 5.3.1.3.

5.3.1.1 DEI in Abhängigkeit des Verdichtungsgrads und des Bahnzugs

Zur Darstellung der Versuchsergebnisse wird in Abbildung 5-13 der DEI_M über den Verdichtungsgrad aufgetragen. Die Diagramme sind nach Aktivmaterialart und Massenbeladung aufgeteilt. Es zeigt sich, dass sich der DEI_M im Bereich von $DEI_M = 1,33 \text{ mm}$ bis $DEI_M = 7,00 \text{ mm}$ bewegt. Sowohl über jedes Aktivmaterial als auch über jede Massenbeladung und jeden Bahnzug zeigt der DEI_M fast durchgängig die niedrigste Ausprägung bei 15 % Verdichtungsgrad und bei 30 % bzw. 35 % die höchste. Die Ergebnisse lassen sich dadurch erklären, dass mit steigender Verdichtung auch die Längung der Kathode zunimmt. Der unbeschichtete Rand verändert sich jedoch nicht. Der energetisch günstigste Zustand ist die Wellenausprägung, je nach Längung entsprechend mit höherer oder geringerer Amplitude. Die Messungen lassen darüber hinaus im Messbereich einen linearen Zusammenhang zwischen Verdichtungsgrad und DEI vermuten.

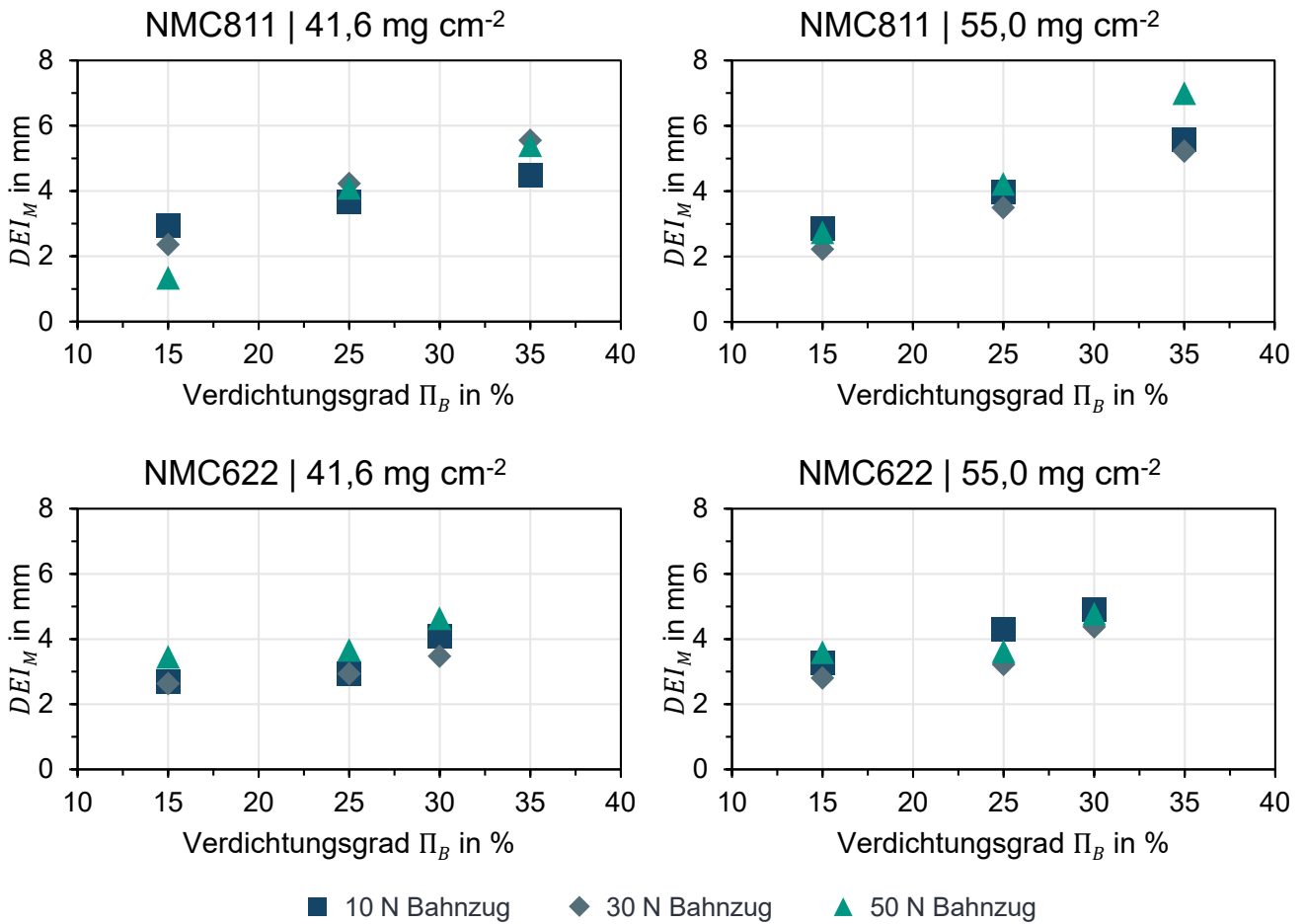


Abbildung 5-13: Charakterisierung der Mittenwellen mittels DEI aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbeladung nach (Mayer & Schwab et al. 2023)

Zur Modellierung des linearen Zusammenhangs wird als Regressionsgerade Formel 5-3 verwendet. Zzgl. wird die Annahme getroffen, dass bei einem Verdichtungsgrad von 0 % keine Welligkeit auftritt und somit $DEI_M = 0 \text{ mm}$ wird.

$$\hat{f}_{K,DEI}(\Pi_B) = a_{K,DEI} \cdot \Pi_B \quad \text{Formel 5-3}$$

Da der Regressionskoeffizient $a_{K,DEI}$ nicht bekannt ist, wird er mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate empirisch ermittelt, s. Formel 5-4 nach (Prorok 2022, S. 135). $e_{DEI,i}$ beschreibt hierbei den Restfehler oder auch Residuum, um den die experimentellen Messwerte $f_{K,DEI,i}$ vom vorhergesagten Modellwert $\hat{f}_{K,DEI,i}$ abweichen.

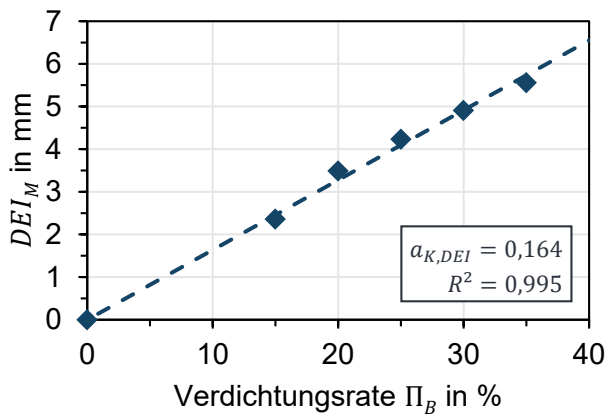
$$\min \left(\sum_i e_{DEI,i}^2 \right) = \min \left(\sum_i (f_{K,DEI,i} - \hat{f}_{K,DEI,i})^2 \right) \quad \text{Formel 5-4}$$

Zur Lösung des Optimierungsproblems wird der Algorithmus „Generalized Reduced Gradient“ verwendet, der als Solver Add-in in Microsoft Excel Professional Plus 2019 verfügbar ist. Aus der Optimierung ergeben sich die optimalen Werte für $a_{K,DEI}$, s. Tabelle 5-4. Zzgl. wird zur Einschätzung der Modellgüte das jeweilige Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet.

Tabelle 5-4: Berechnete Parameter für den Regressionskoeffizienten $a_{K,DEI}$ sowie das Bestimmtheitsmaß R^2

Aktivmaterial	Massenbeladung in mg cm^{-2}	Bahnzug in N	$a_{K,DEI}$	R^2
NMC811	41,6	10	0,141	0,920
NMC811	41,6	30	0,162	0,997
NMC811	41,6	50	0,150	0,947
NMC811	55,0	10	0,163	0,989
NMC811	55,0	30	0,146	0,997
NMC811	55,0	50	0,189	0,984
NMC622	41,6	10	0,135	0,929
NMC622	41,6	30	0,124	0,904
NMC622	41,6	50	0,161	0,899
NMC622	55,0	10	0,173	0,964
NMC622	55,0	30	0,145	0,946
NMC622	55,0	50	0,164	0,882
Mittelwerte			0,154	0,947

Es zeigt sich, dass ein lineares Modell den DEI_M in Abhängigkeit von Π_B mit sehr guter Genauigkeit beschreibt, sodass im Mittel ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,947$ erreicht wird. Zur Absicherung der Aussage des linearen Zusammenhangs zwischen DEI_M und Π_B werden für das Material NMC811 mit $41,6 \text{ mg cm}^{-2}$ Massenbeladung und konstanten Bahnzug von 30 N zwei weitere Modellstützpunkte für 20 % und 30 % Verdichtungsgrad experimentell ermittelt. Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 5-14 dargestellt.



Faktor	Ausprägung
Material	NMC811
Massenbeladung	41,6 mg cm ⁻²
Verdichtungsgrad	15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 %, zzgl. Annahme 0 %
Bahnzug	30 N

Abbildung 5-14: Erweiterte Untersuchung des Materials NMC811 mit 41,6 mg cm⁻² bei variierenden Verdichtungsraten und konstantem Bahnzug in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)

Durch die weiteren Modellstützpunkte ändert sich der Regressionskoeffizient von $\alpha_{K,DEI} = 0,162$ zu $\alpha'_{K,DEI} = 0,164$ sowie das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,997$ zu $R^{2'} = 0,995$. Da die Abweichung nur minimal ist, kann somit der lineare Zusammenhang zwischen DEI_M und Π_B bestätigt werden. Dies entspricht den Beobachtungen von (Günther 2023, S. 120) für das Material NMC111, wobei für NMC811 und NMC622 mit den hier vorliegenden Parametereinstellungen die Wellen deutlich höher ausfallen.

Hinsichtlich des Bahnzugs ist in Abbildung 5-13 jedoch kein Zusammenhang ersichtlich, vielmehr scheinen die jeweiligen Messpunkte beim jeweiligen Verdichtungsgrad in der Ausprägung des DEI_M zufällig zu streuen. Dies bestärkt auch die Auswertung der Mittelwerte der jeweiligen Bahnzüge mit zugehöriger Standardabweichung als Haupteffektdiagramm, das in Abbildung 5-15 dargestellt ist.

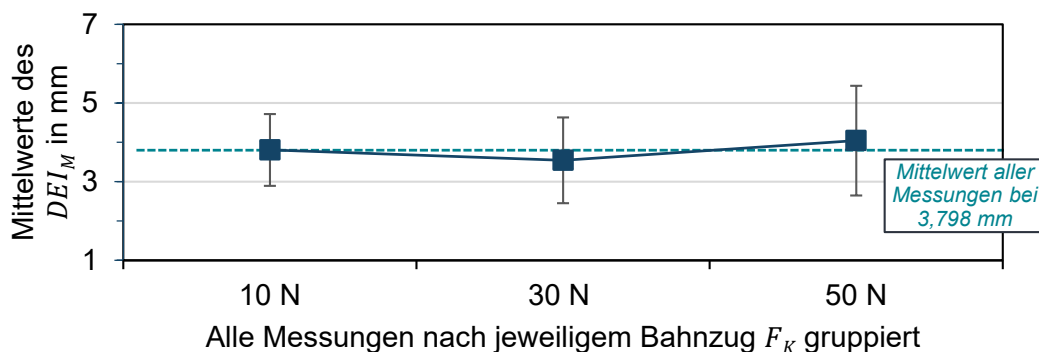
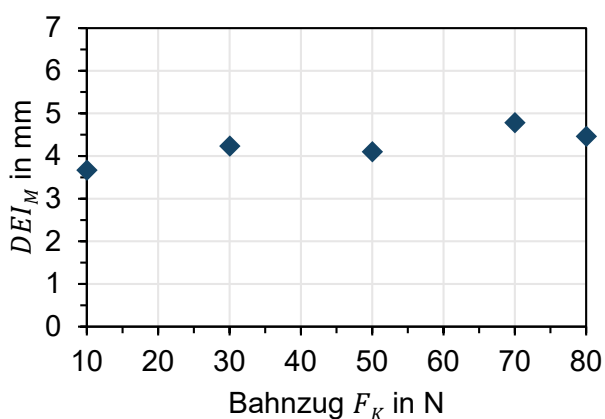


Abbildung 5-15: Haupteffektdiagramm für die Mittelwerte des DEI_M aufgeschlüsselt nach den Bahnzügen

Im Hinblick auf die Schwankung des DEI_M bei $F_K = 50 \text{ N}$ stellt sich die Frage, ob bei noch höheren Bahnzügen Änderungen im Verhalten zu erwarten sind. (Bold 2023, S. 103–104) untersucht beispielsweise Werte von 0 N bis 100 N.

Aus diesem Grund wird jeweils eine Stichprobe mit den Bahnzügen $F_K = 70 \text{ N}$ und $F_K = 80 \text{ N}$ durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Interpretation korrekt ist und der Bahnzug keinen wesentlichen Einfluss auf die Mittenwelligkeit besitzt. Hierzu wird ebenfalls das Material NMC811 mit $41,6 \text{ mg cm}^{-2}$ verwendet und mit konstantem Verdichtungsgrad von $\Pi_B = 25 \%$ kalandriert, s. Abbildung 5-16.



Faktor	Ausprägung
Material	NMC811
Massenbeladung	$41,6 \text{ mg cm}^{-2}$
Verdichtungsgrad	25 %
Bahnzug	10 N, 30 N, 50 N, 70 N, 80 N

Abbildung 5-16: Erweiterte Untersuchung des Materials NMC811 mit $41,6 \text{ mg cm}^{-2}$ bei variierenden Bahnzügen und konstantem Verdichtungsgrad (25 %) in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)

Die weitere Untersuchung bestärkt die Annahme. Es lässt sich zwar eine leichte Erhöhung des DEI_M bei steigendem Bahnzug erkennen, wie es auch bei (Bold 2023, S. 114) gezeigt wird, allerdings kann aufgrund der minimalen Steigerung lediglich eine leichte Tendenz vermutet werden und aufgrund der im Prozess auftretenden Schwankung nicht final untersucht werden.

5.3.1.2 DEI in Abhängigkeit des Aktivmaterials und der Massenbeladung

Zur Untersuchung des DEI_M in Abhängigkeit des Aktivmaterials und der Massenbeladung werden die Messungen jeweils gruppiert und gegenübergestellt, s. Abbildung 5-17.

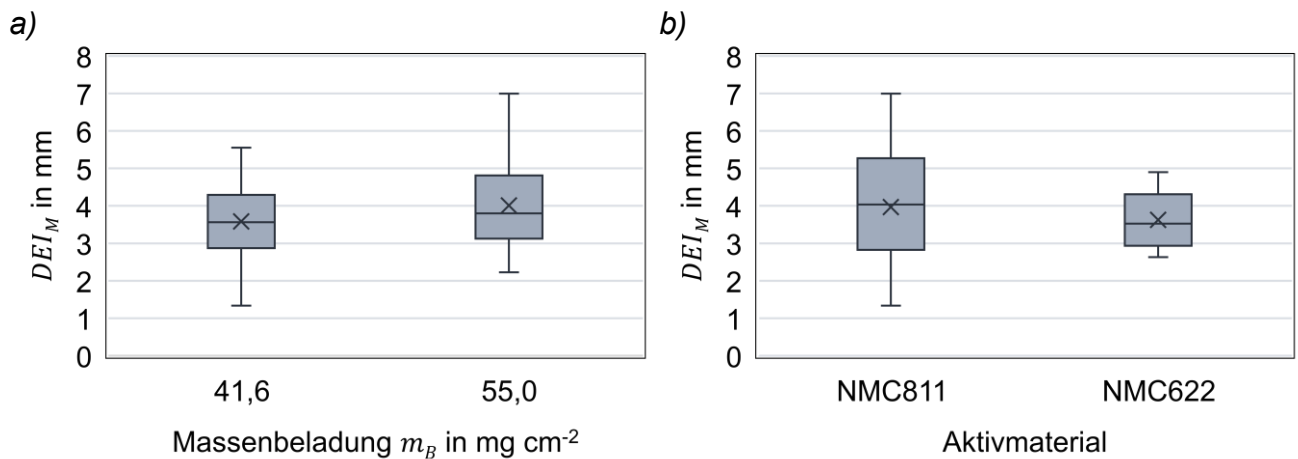


Abbildung 5-17: Gegenüberstellung aller Messungen nach Massenbeladung m_B in a) und nach Aktivmaterial in b)

Es zeigt sich, dass bei der Massenbeladung m_B geringe Unterschiede beobachtbar sind. Entgegen der Beobachtung von (Günther 2023, S. 119–120) bei NMC111, wo die Massenbeladung als signifikante Einflussgröße auf die Wellenbildung identifiziert wird, zeichnet sich bei den hier untersuchten deutlich höheren Massenbeladungen von NMC622 und NMC811 eine Sättigung des Effekts ab. Bei näherer Betrachtung kann die leicht höhere Ausprägung des DEI_M bei $m_B = 55,0\ mg\ cm^{-2}$ auf die Linienlast zurückgeführt werden. Die prozentuale Verdichtung der Kathoden ist zwar bei beiden Massenbeladungen gleich verteilt, in Absolutwerten erfährt die höhere Massenbeladung jedoch eine höhere Linienlast, wie Tabelle 5-5 zeigt. Dies führt in der Gesamtheit zu stärkeren Ausprägungen des DEI_M , da durch die im Schnitt höhere Linienlast die Kathode stärker gelängt wird.

Tabelle 5-5: Linienlast in Abhängigkeit des Aktivmaterials, der Massenbeladung und Verdichtungsgrads nach (Mayer & Schwab et al. 2023)

Aktivmaterial	Massenbeladung m_B in $mg\ cm^{-2}$	Linienlast in $N\ mm^{-1}$ nach Verdichtungsgrad Π_B			
		15 %	25 %	30 %	35 %
NMC811	41,6	280 ±15	540 ±12	-	1550 ±20
	55,0	300 ±12	640 ±14	-	1850 ±35
NMC622	41,6	360 ± 8	780 ±12	1370 ±19	-
	55,0	380 ±18	860 ±10	1850 ±22	-

Bei dem Aktivmaterial hingegen ist auffällig, dass die Streuung des DEI_M bei NMC622 deutlich geringer als bei NMC811 ausfällt. Die Linienlast von NMC622 startet zunächst bei etwas höheren Werten, wodurch die Streuungsdifferenz nach unten erklärt werden kann. Bei 30 % bzw. 35 % hingegen, ist die maximale Linienlast bei beiden Materialien

gleich, sodass die Streuungsdifferenz nach oben dadurch nicht erklärt werden kann. Zu begründen ist der Aspekt jedoch mit den Aktivmaterialpartikeln. NMC622 hat mit einem Median von $d_{50} = 12 \mu m$ im Schnitt einen größeren Partikeldurchmesser als NMC811 mit $d_{50} = 10 \mu m$. Es ist somit anzunehmen, dass bei NMC622 bereits die dichtest mögliche Kugelpackung der Beschichtung erreicht ist. Statt der weiteren Längung des Substrats durch das Verschieben und Eindringen der Partikel in das Substrat, beginnen die Partikel zu zerbrechen. Durch die kleineren Partikel können diese in existierende Hohlräume verschoben werden, wodurch die Beschichtung wiederum weiter komprimiert werden kann, ohne dass sich Substrat und Beschichtung zwangsläufig längen. Gemeinsam mit dem Einfluss der Partikel sowie der zu Beginn höheren Linienlasten bei 15 % Verdichtungsgrad ergibt sich somit die geringere Streuung des DEI_M .

5.3.1.3 Anzahl der Mittenwellen

Als weitere Zielgröße wird die Anzahl der Mittenwellen $n_{W,M}$ nach der Kalandrierung ausgewertet, s. Abbildung 5-18. Für die Messung wird ein Kathodenabschnitt von 300 mm direkt nach dem Walzenpaar vor der ersten Umlenkrolle mittels GOM ATOS Core 135 aufgenommen, wobei die Kathode weiterhin unter Bahnzug stand. Anhand der gemessenen Punktwolke wird $n_{W,M}$ ermittelt, indem die einzelnen Wellen gezählt werden.

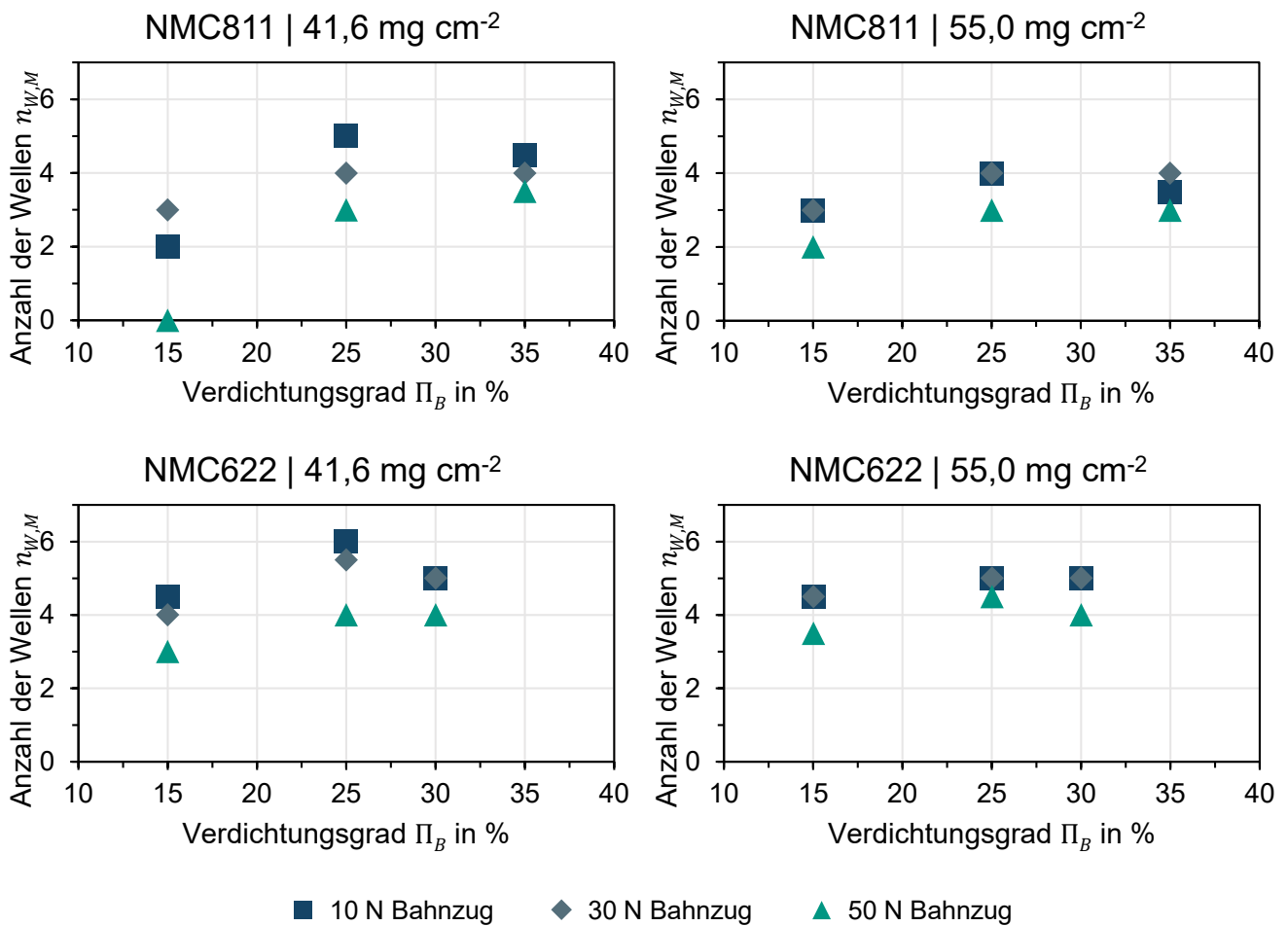


Abbildung 5-18: Charakterisierung der Mittenwellen mittels der normierten Wellenanzahl $n_{W,M}$ pro 300 mm Kathodenbahn aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbeladung in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)

Im Gegensatz zu der Charakterisierung mittels DEI_M zeigt sich, dass die Anzahl der Wellen nicht linear ansteigt. Bei $\Pi_B = 15\%$ ist die Anzahl der Maxima zwar immer am geringsten, zwischen 25 % und 30 % bzw. 35 % ist es jedoch nicht eindeutig. Hier stagnieren die Werte oder fallen in einigen Fällen auch wieder ab, sodass die Beobachtung von (Günther 2023, S. 119–120) für NMC111-Kathoden auch für NMC622 und NMC811 bestätigt werden kann. Durch die Verdichtung wird das beschichtete Material steifer, sodass es energetisch günstiger erscheint, dass sich die Wellenamplitude erhöht, als dass kürzere Wellen ausgebildet werden. Da die Wellen insbesondere bei weniger stark kalandrierten Kathoden nicht immer eine Gleichmäßigkeit wie in Abbildung 5-12 ausbilden, kann mit Formel 5-5 nur eine ungefähre Wellenlänge λ aus den Ergebnissen ermittelt werden. $l_{Kathode}$ ist hierbei der ausgewertete Kathodenabschnitt und $n_{W,M}$ die Anzahl der Mittenwellen.

$$\lambda = \frac{l_{\text{Kathode}}}{n_{W,M}}$$

Formel 5-5

Es zeigt sich, dass sich die Wellenlängen etwa zwischen 50 mm (NMC622, 41,6 mg cm⁻², 25%, 10 N) bis zu 150 mm (NMC811, 41,6 mg cm⁻², 15%, 10 N) bewegen, sodass die daraus später vereinzelt Kathodenblätter mit einer Länge von 208 mm über der maximalen Wellenlänge liegen. (Günther 2023, S. 119) ermittelt bei NMC111 Wellenlängen mit bis zu etwa 50 mm, sodass die gemessenen Wellen im Bereich der Literatur liegen.

Auffällig ist die Beobachtung, dass die Anzahl der Wellen bei $F_B = 50 \text{ N}$ durchschnittlich am geringsten ist und insbesondere im Vergleich zu $F_B = 30 \text{ N}$ abfällt. Deutlich macht dies Abbildung 5-19 a). Obwohl der Bahnzug zunächst hauptsächlich über den unbeschichteten und nicht gelängten Randbereich des Substrats aufgenommen wird, wird auch der beschichtete Bereich der Kathode gerade bei höheren Bahnzügen gestreckt. Dadurch längen sich die Wellen und entsprechend senkt sich die Anzahl der Maxima gerechnet auf eine definierte Strecke. Auch (Bold 2023, S. 114–115) deutet diesen Zusammenhang an. Die breite Streuung der Wellenzahl bei 10 N ist darauf zurückzuführen, dass bei geringerem Bahnzug Eigenspannungen und Inhomogenitäten im Prozess nicht durch den Bahnzug geglättet werden, sondern sich variierend auf die Wellenzahl ausprägen.

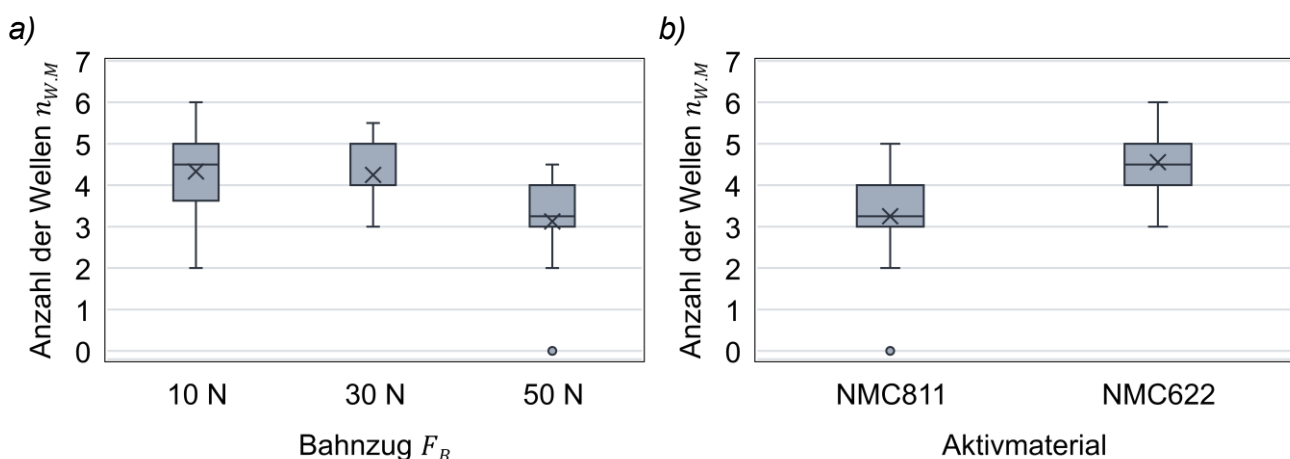


Abbildung 5-19: Gegenüberstellung aller gemessenen Wellen (auf 300 mm Kathodenbahn normiert) nach Bahnzug F_B in a) und nach Aktivmaterial in b)

Weiterhin zeigt sich ein deutlicher Unterschied bei der Wellenzahl zwischen NMC811 und NMC622, s. Abbildung 5-19 b). NMC622 hat trotz gleichem Bahnzug eine höhere Anzahl an Wellen, woraus geschlossen werden kann, dass sich die Steifigkeit

der NMC622-Kathode nach der Kalandrierung geringer ausprägt als die der NMC811-Kathode.

5.3.2 Randwellen am Beschichtungsübergang

Zur Auswertung der Randwellen am Beschichtungsübergang wird hinsichtlich des Mess- und Auswerteablaufs wie bei den Mittenwellen vorgegangen. Die einzige Abweichung ist die Auswertung der Randwelle bei $y_K = 150 \text{ mm}$. Zur Auswertung wird der DEI_R für die Randwellen ermittelt. In Abbildung 5-20 ist eine exemplarische Auswertung dargestellt.

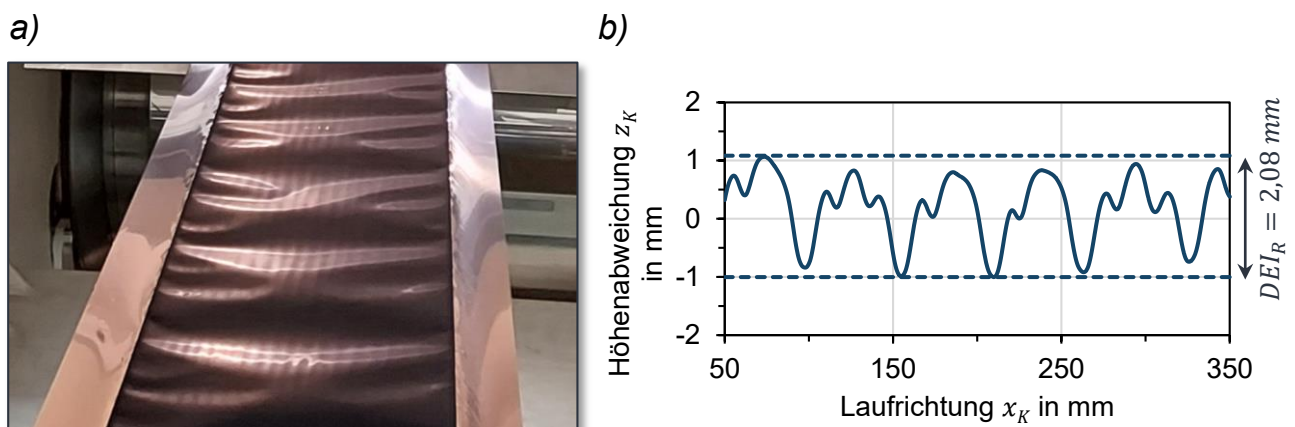


Abbildung 5-20: Kathode mit Randwellen und typischem Übergang von Rand- zu Mittenwellen in a) und exemplarische Auswertung der Randwellenschnittlinie mittels DEI_R in b)

Es zeigt sich, dass sich in der Schnittlinie am Rand mehrere Wellen überlagern. Zum einen findet sich Wellen mit etwa der Frequenz der Mittenwelle dort wieder. Deren Wellenberge werden allerdings eingedrückt, sodass sich mehrere kleinere Wellen zusätzlich zur Mittenwelle ausbilden. Dies ist auf die Wirkung des nicht beschichteten und dadurch nicht gelängten Substratbereichs zurückzuführen. Der Beschichtungsrand wird ebenso durch die Kalandrierung gelängt, allerdings verhindert die Nähe zum unbeschichteten Substrat eine höhere Ausprägung der Welle und bildet die kleineren Randwellen aus. Die Interaktion der Rand- und Mittenwellen über die Beschichtungsbreite führt zu dem charakteristischen Wellenmuster der Kathode, das in Abbildung 5-20 a) zu erkennen ist.

Zur Quantifizierung der Randwellen im Vergleich zu den Mittenwellen wird für jede Kathode der DEI sowohl für die Mitten- als auch die Randwellen als Balkendiagramm in Abbildung 5-21 dargestellt.

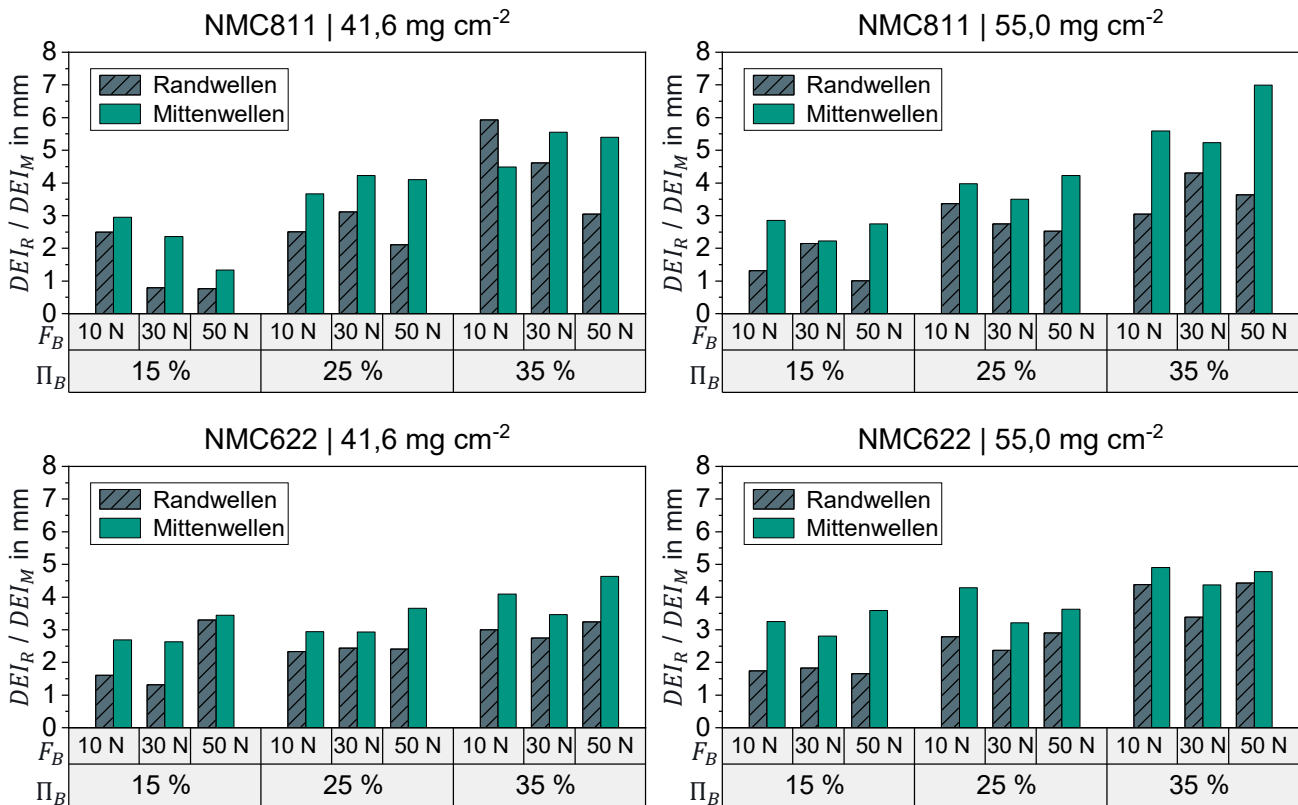


Abbildung 5-21: Vergleich des DEI_R der Randwellen mit dem DEI_M der Mittenwellen gruppiert nach Aktivmaterial und Massenbeladung m_B , aufgetragen über den Verdichtungsgrad Π_B in % und den Bahnzug F_B in N

Es zeigen sich insbesondere zwei Aspekte. Zum einen zeigen die Randwellen den Trend, dass bei steigendem Verdichtungsgrad Π_B ebenfalls der DEI_R ansteigt, was so auch erwartet werden kann, da das Material am Rand ebenfalls eine Dehnung in Abhängigkeit des Verdichtungsgrads erfährt. Zum anderen zeigen die Randwellen bis auf eine Messung durchgängig einen geringeren DEI_R als der DEI_M bei den Mittenwellen. Das ist insofern begründbar, als dass der Randbereich zwar gedehnt wird, allerdings durch den angrenzenden, unbeschichteten Bereich sich weniger in z_K -Richtung ausbreiten kann. Der höhere DEI_R der Randwelle gegenüber dem DEI_M der Mittenwelle in der Messauswertung von NMC811, $41,6 \text{ mg cm}^{-2}$, 35 %, 10 N (s. Abbildung 5-21 links oben) kann auf die Methode der Messauswertung zurückgeführt werden. Die visuelle Betrachtung der Schnittkurven zeigt, dass mittels der Kennzahl DEI_R die Randwellenauswertung etwas zu hoch ausfällt, da zum einen die kurzen Randwellen oftmals durch die Mittenwellen überlagert werden, sodass die DEI_R größer berechnet wird. Zum anderen verstärkt der Durchgang der Kathode aufgrund der gewählten Auswertestrecke weiter den Effekt der Überschätzung.

Bei der visuellen Auswertung zeichnet sich deutlich ab, dass die Randwellen im Schnitt eine deutlich höhere Wellenfrequenz aufweisen, was so auch bereits ohne Messung ersichtlich ist. Zur Quantifizierung der Beobachtung werden entsprechend der Methodik bei den Mittenwellen ebenfalls die Randwellen in einem Abschnitt von 300 mm gezählt, s. Abbildung 5-22.

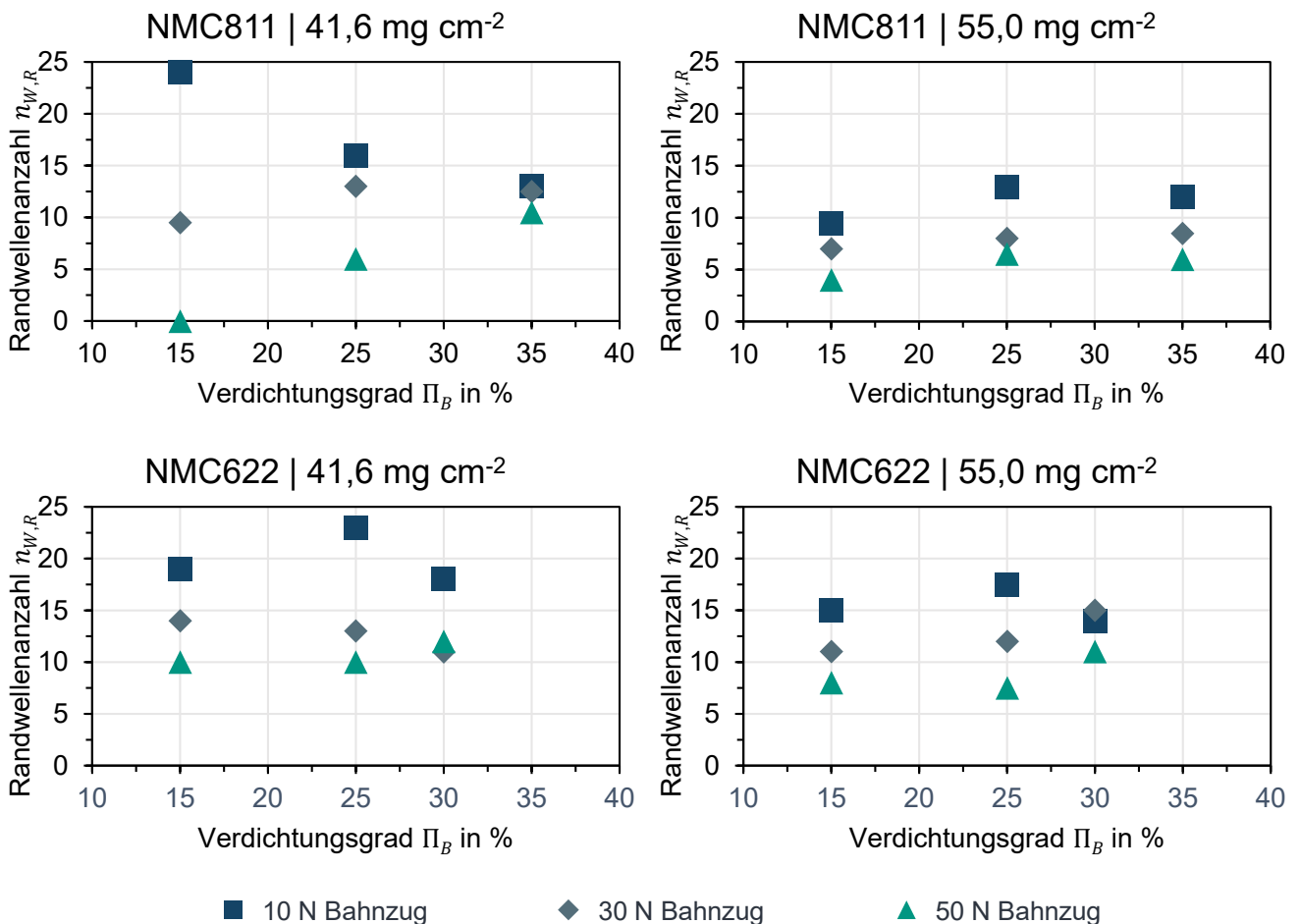


Abbildung 5-22: Auf 300 mm Kathodenbahn normierte Anzahl der Randwellen $n_{W,R}$ aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbeladung

Es zeigt sich zunächst ein diffuses Bild der Randwellenanzahl in Abhängigkeit des Verdichtungsgrads, sodass hierfür schwerlich ein Zusammenhang mit Π_B festgestellt werden kann. Der Eindruck aus der Arbeit von (Günther 2023, S. 122–124), in der Randwellen für NMC111 untersucht wurden, kann bestätigt werden, da die Ausprägung und die Streuung der Randwellen stark variieren und eine Systematik hinsichtlich der Wellenanzahl kaum zu erkennen ist. Lediglich die Abhängigkeit der Randwellenanzahl vom Bahnzug ist klar erkennbar, sodass geschlussfolgert werden kann, dass die Randwellenlänge mit steigendem Bahnzug zunimmt. Die Beobachtung ist durch die Nähe der

Randwelle zum unbeschichteten Substrat zu erklären, das den Großteil der Bahnzugspannung durch das Ausbleiben der Längung bei der Kalandrierung aufnimmt. Durch die vom Bahnzug abhängige Dehnung des unbeschichteten Substrats am Rand werden auch die Randwellen gestreckt. In Kombination aus Randwellenanzahl $n_{W,R}$ und DEI_R lässt sich mit Formel 5-5 die Randwellenlänge berechnen. Im Hinblick auf die auftretende Streuung ergibt sich ein Bereich von etwa 12,5 mm bis 75 mm Randwellenlänge, was den visuellen Eindruck der kürzeren Wellen im Vergleich zu dem Bereich der Mittenwellenlänge von 50 mm bis 150 mm wie erwartet bestätigt.

Zusammengefasst zeigen NMC622- und NMC811-Kathoden wie aus der Literatur bekannt Mitten- und Randwellen. Der DEI_M der Mittenwellen zeigt dabei Ausprägungen von $DEI_M = 1,33 \text{ mm}$ bis $DEI_M = 7,00 \text{ mm}$, wobei bei steigendem Verdichtungsgrad ein linear ansteigendes Verhalten gezeigt wird. Bei den Randwellen ergeben sich mit $DEI_R = 0,76 \text{ mm}$ bis $DEI_R = 5,9 \text{ mm}$ erwartungsgemäß geringere Ausprägungen. Auch bei der Anzahl der Wellen ergeben sich für die Mittenwellen mit einem Bereich von $n_{W,M} = 0$ bis $n_{W,M} = 6$ im Vergleich zu den Randwellen mit einem Bereich von $n_{W,R} = 0$ und $n_{W,R} = 24$, jeweils auf einen Kathodenabschnitt von 300 mm, größere Wellenlängen. Es stellt sich nun die Frage, wie sich die Effekte der Wellenbildung auf die geometrische Form der Kathodeneinzelblätter auswirken, was im nächsten Kapitel untersucht wird.

5.4 Analyse der geometrischen Form der vereinzelter Kathoden

Zur Analyse der geometrischen Form der Einzelblätter werden die in Kapitel 5.3 untersuchten, kalandrierten Kathoden entsprechend der in Kapitel 5.2 dargestellten Vorgehensweise vereinzelt und mittels GOM ATOS Core 135 vermessen. Im Folgenden werden in Kapitel 5.4.1 die charakteristischen geometrischen Formen der Einzelblätter diskutiert und in Kapitel 5.4.2 quantifiziert. Abschließend wird in Kapitel 5.4.3 der zeitliche Einfluss in der Herstellung von Einzelblättern untersucht.

5.4.1 Charakteristische Formen der Einzelblätter

Da die Kathoden nach der Kalandrierung auf einem 6-Zoll-Coilkern aufgewickelt werden und die Blätter je nach Prozessführung beidseitig weiterverarbeitet werden können, wird jedes Kathodenblatt auf beiden Seiten der Beschichtung liegend vermessen. Aufgrund der insgesamt geringen Elektrodendicke und der Verwendung mehrerer Coilkerne bei der Kalandrierung kann angenommen werden, dass alle Kathoden etwa mit

dem gleichen Durchmesser von 6 Zoll bzw. 152,4 mm vor der Vereinzelung aufgewickelt waren. Als Namenskonvention wird Folgendes festgelegt:

- Seite A: Das Einzelblatt liegt auf einem Tisch und der Coilkern befindet sich gedanklich darüber, das Ableiterfähnchen befindet sich auf der rechten Seite.
- Seite B: Das Einzelblatt liegt auf einem Tisch und der Coilkern befindet sich gedanklich darunter, das Ableiterfähnchen befindet sich auf der linken Seite.

Zur Charakterisierung der Form werden drei Schnittlinien durch das Kathodenblatt gezogen und das Höhenprofil ausgewertet, s. Abbildung 5-23.

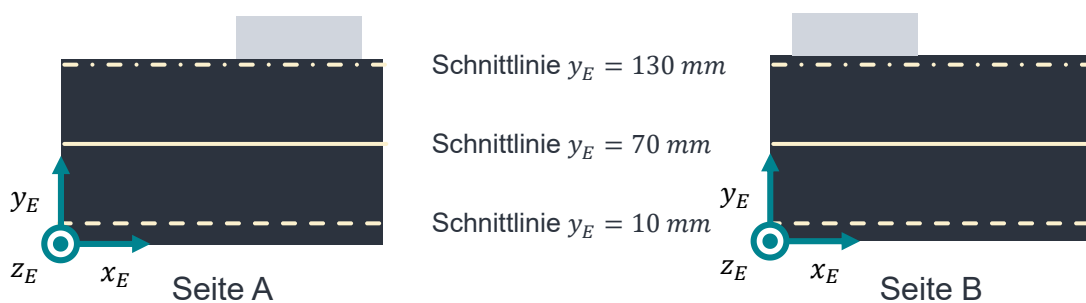


Abbildung 5-23: Charakterisierung der Kathodenblätter mittels Schnittlinien auf Seite A und Seite B

Die Analyse der Messergebnisse zeigt zunächst, dass die vereinzelt Kathoden nicht nur eine typische geometrische Form ausbilden, sondern je nach Parameterkonfiguration und Betrachtungsseite verschiedene Ausprägungen zeigen. Exemplarisch sind die häufigsten Ausprägungen anhand der beiden Schnittlinien $y_E = 70 \text{ mm}$ und $y_E = 130 \text{ mm}$ in Abbildung 5-24 dargestellt.

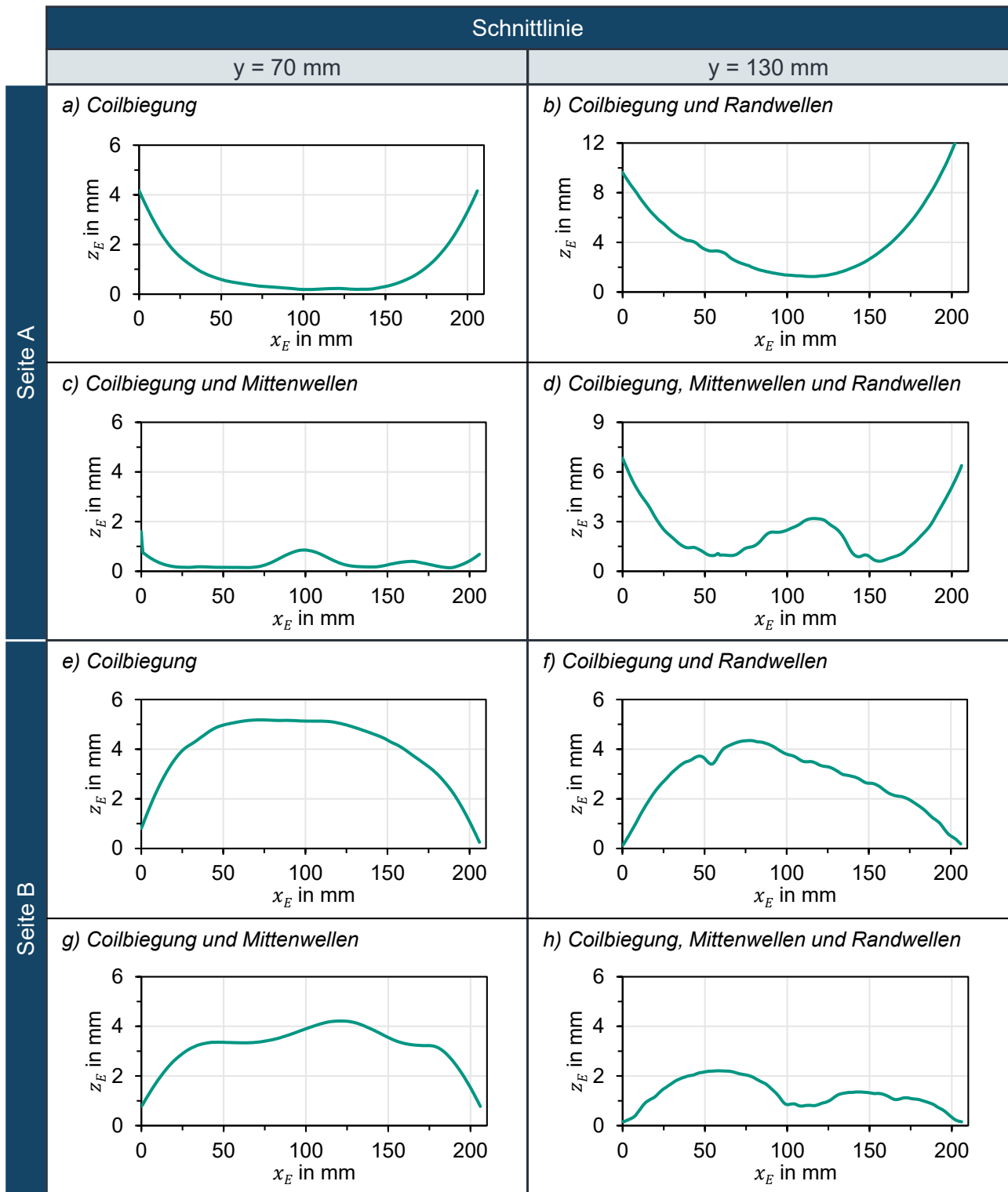


Abbildung 5-24: Häufig auftretende Charakteristiken der Schnittlinien der Kathodeneinzelblätter bei $y_E = 70 \text{ mm}$ und $y_E = 130 \text{ mm}$

So ist zunächst die Betrachtungsseite des Kathodenblattes ein prägender Faktor. Es zeigt sich, dass sich bei Seite A die kurzen Kanten ($x_E = 0 \text{ mm}$ und $x_E = 207 \text{ mm}$) nach oben wölben, s. Abbildung 5-24 a) – d). Seite B hingegen zeigt ein umgekehrtes

Bild. Die kurzen Kanten wölben sich nach unten und tragen dabei den mittleren Teil der Kathode, der dann über dem Tisch schwebt, s. Abbildung 5-24 e) – h). Die Ursache der typischen Wölbung kann auf die Coilaufwicklung nach der Kalandrierung zurückgeführt werden. Bewusst wurden die Kathodenbahnen nach der Kalandrierung auf mehrere Coilkern aufgewickelt, um für die vorliegende Untersuchung den „Worst Case“ durch eine nahe Lage der Kathode zum Coilkern abzubilden. Durch die Aufwicklung mit Bahnzug wird die Kathode in die Form des Coils gedrückt, wodurch Zug- bzw. Druckspannungen in die obere und untere Beschichtungsschicht eingebracht werden. Zunächst können plastische Verformungen bereits durch die Aufwicklung in die Kathode eingebracht werden, die durch den Effekt der viskoelastischen Eigenschaft des Beschichtungsmaterials verstärkt werden. Die eingebrachten Spannungen relaxieren mit der Zeit und die Wölbung des vereinzelt Blatts bleibt zurück. Die Höhe der Ausprägung wird in Kapitel 5.4.2 detailliert untersucht. Anzumerken ist allerdings auch, dass die Coilbiegung nicht in jedem Einzelblatt auftritt.

Abbildung 5-24 c) und g) zeigt einen weiteren Effekt, bei dem sich insbesondere in der Mitte einiger Kathodenblätter Welligkeiten beobachten lassen. Basierend auf den Untersuchungen in Kapitel 5.3.1 können diese auf die Mittenwellen nach der Kalandrierung zurückgeführt werden. Bei Abbildung 5-24 c) unterstützt zusätzlich die durch das Coil induzierte Wölbung des Blattes die Ausbildung der Mittenwellen, da die äußeren, nach oben gewölbten Kanten durch die Schwerkraft nach unten gezogen werden und die Mitte des Blattes zusätzlich in die positive z_E -Richtung drücken. Die Mittenwellen sind allerdings nicht in jedem Einzelblatt zu sehen, was dann zu den Schnittlinienverläufen in Abbildung 5-24 a) und e) führt. Hier ist anzunehmen, dass sich durch die Aufwicklung auf das Coil auch die Mittenwellen herausdrücken.

Teilweise sind Mittenwellen auch an den Rändern bei Schnittlinie $y_E = 130 \text{ mm}$ zu sehen, s. Abbildung 5-24 d) und h), allerdings ist hier häufig die Differenzierung schwierig. Der Übergang vom Ableiterfähnchen zur Mitte des Kathodenblatts in x_E -Richtung sorgt für einen Steifigkeitsabfall, der je nach Eigensteifigkeit zu einem Aufwölben (Seite A) bzw. Absenken (Seite B) der Kathode führen kann, und visuell den Anschein einer Mittenwelle erweckt.

Als letzten Effekt lassen sich in Schnittlinie $y_E = 130 \text{ mm}$ häufig kleine Welligkeiten beobachten, die die Mittenwellen überlagern, s. Abbildung 5-24 b), d), f) und h). Ursächlich hierfür sind die Randwellen nach der Kalandrierung, die häufig, aber auch nicht immer am Rand des Einzelblattes bestehen bleiben.

Zur Quantifizierung der beschriebenen Ausprägungen der 305 Einzelblätter bzw. 610 Messungen, wird deren Auftreten in Abbildung 5-25 gezählt. Hierfür werden die Messungen visuell auf das Auftreten der typischen Muster von Randwellen, Mittenwellen und Coilbiegung geprüft. Die Intensität wird hierbei nicht berücksichtigt.

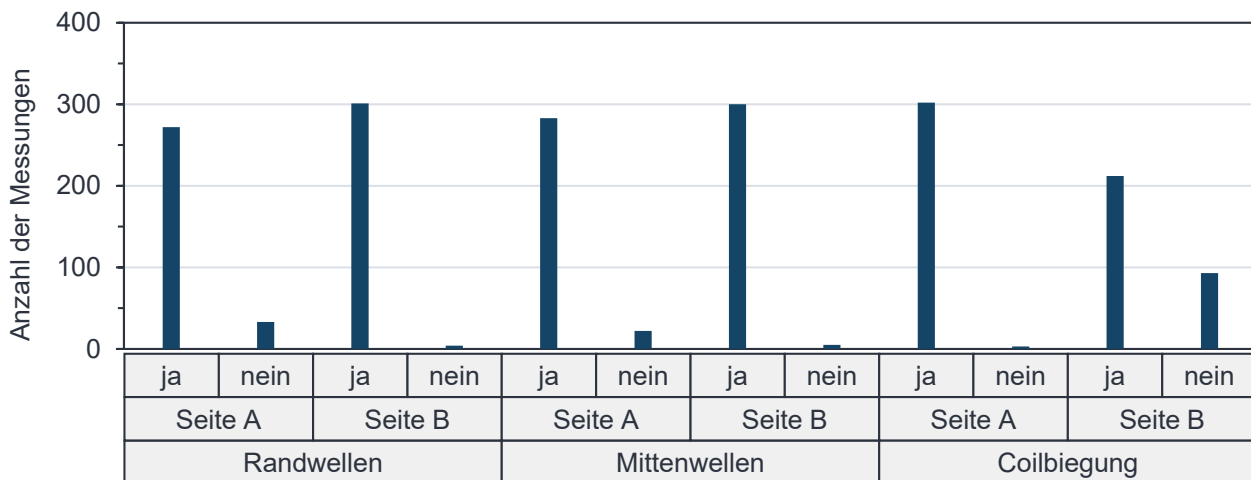


Abbildung 5-25: Auftreten von Rand- und Mittenwellen sowie der Coilbiegung

Es zeigt sich, dass alle Effekte durchgängig in den Einzelblättern vertreten sind. Auffällig ist zudem, dass sich die Coilbiegung auf Seite B bei 93 Einzelblättern nicht zeigt, auf Seite A jedoch nur bei 3. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei Seite B das gesamte Eigengewicht auf den Seiten lastet und diese bei Kathoden mit geringer Steifigkeit, also folglich geringerem Verdichtungsgrad der Beschichtung, nach unten drückt. Bei Seite A liegt das Eigengewicht zunächst auf dem Tisch und die Seiten können sich auch bei geringerer Steifigkeit der Beschichtung nach oben wölben.

Weiterhin ist allerdings anzumerken, dass bei der visuellen Betrachtung der Rand- und Mittenwellen keine Regelmäßigkeit der Wellenlänge und Amplitude, wie sie bei der Kalandrierung zu beobachten ist, festgestellt werden kann. Vielmehr treten auch vereinzelte Wellenberge auf, die auch auf Inhomogenitäten im Material hindeuten können. Die Ausprägung der Amplitude scheint zudem auch meist geringer zu sein, als es nach der Kalandrierung zu beobachten ist, und streut stark. Es kann daraus gefolgert werden, dass eine Streckung der Kathode nach der Vereinzelung erfolgt.

Ein weiterer Aspekt der geometrischen Form ist zudem die Position des unbeschichteten Ableiterföhnchens. Abbildung 5-26 zeigt exemplarisch ein typisches Kathodenblatt mit den drei Schnittlinien $y_E = 10 \text{ mm}$, $y_E = 70 \text{ mm}$ und $y_E = 130 \text{ mm}$. Auf Seite A liegend zeigt sich der höchste Punkt bei Schnittlinie $y_E = 130 \text{ mm}$ und $x_E = 207 \text{ mm}$, also auf der Seite des Ableiterföhnchens. Auf Seite B ist der höchste Punkt der Kathode ebenfalls bei Schnittlinie $y_E = 130 \text{ mm}$ und leicht asymmetrisch zum Ableiterföhnchen hin ausgerichtet. Die Maxima der jeweiligen Wölbung sind somit sowohl bei Seite A als auch bei Seite B durch die Position des Ableiterföhnchens beeinflusst, was sich auf dessen versteifende Wirkung ähnlich einer Sicke bei dünnen Blechen zurückführen lässt. Auch (Weinmann 2022, S. 114–115) deutet den Einfluss des Ableiterföhnchens bereits an. Zusätzlich ist sowohl bei Seite A als auch bei Seite B zu sehen, dass die maximale Ausprägung der Schnittlinie $\max(z_{E,y}(x))$ zunimmt je näher die Schnittlinie sich am Ableiterföhnchen befindet, s. Abbildung 5-26.

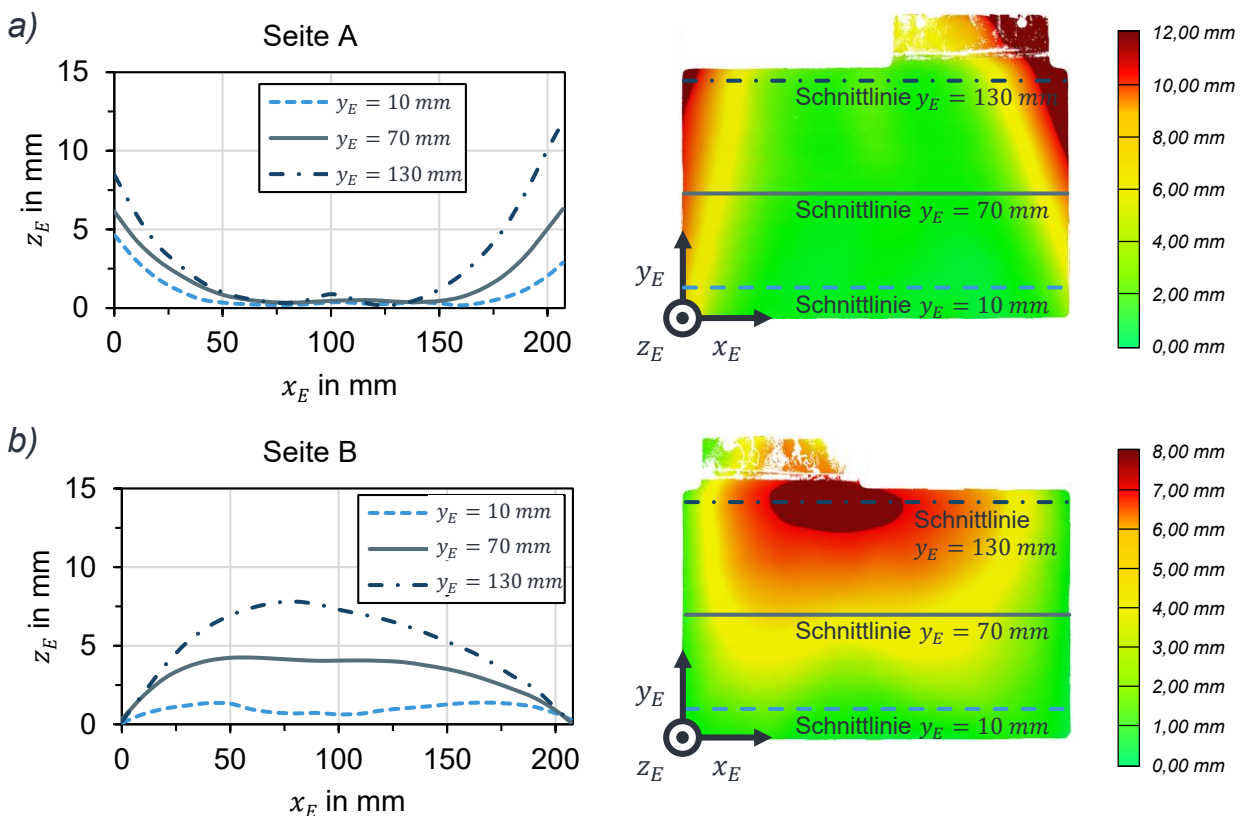


Abbildung 5-26: Exemplarische Messung einer vereinzelter Kathode mit den drei Schnittlinien $y_E = 10 \text{ mm}$, $y_E = 70 \text{ mm}$ und $y_E = 130 \text{ mm}$, gedreht auf Seite A in a) und Seite B in b) in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)

Diese Beobachtung lässt sich durchgehend in den Messergebnissen beobachten. Zur Quantifizierung werden aus den 36 Versuchen zunächst alle Schnittlinien der parametergleichen Messreplikationen bei $y_E = 130 \text{ mm}$ gemittelt, um Prozessschwankungen zu glätten. Anschließend werden die jeweiligen Maxima ermittelt und auf den jeweiligen Messpunkt kumuliert, s. Abbildung 5-27.

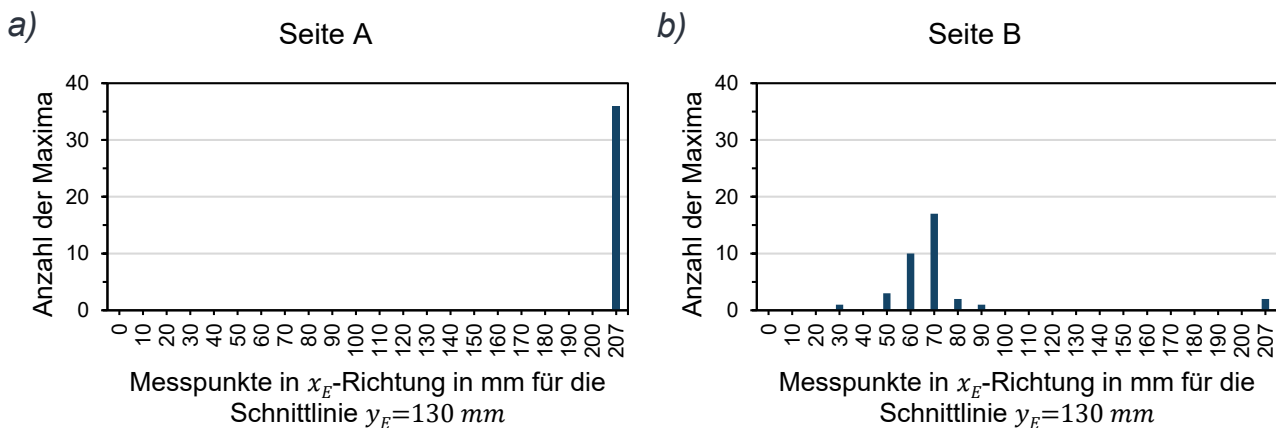


Abbildung 5-27: Verteilung der Maxima in der Schnittlinie $y_E = 130 \text{ mm}$ der ausgewerteten Messpunkte der 36 Parametervariationen jeweils auf Seite A in a) und Seite B in b) nach (Mayer & Schwab et al. 2023)

Es zeigt sich, dass die Beobachtung quantitativ bestätigt werden kann. Zusammenfassend lässt sich damit festhalten, dass die geometrische Form der Kathode auf die sich überlagernden Effekte der Coilbiegung und der Fortpflanzung der Mitten- und Randwellen zurückführen lässt. Außerdem besitzt der Ableiter einen versteifenden Effekt im Kathodenblatt und beeinflusst insbesondere die Ausprägung der Maxima.

5.4.2 Quantifizierung der Ebenheitsabweichung

Aus Abbildung 5-26 wird schnell ersichtlich, dass die Auswertung eines *DEI* nicht sinnvoll ist, da sich keine wiederholende Welle ausbildet, sondern die Form von verschiedenen Effekten überlagert wird. Es stellt sich trotzdem die Frage, wie die Ebenheitsabweichungen der vereinzelt Elektroden von den Einflussfaktoren abhängen. Zur Untersuchung werden, wie bereits zuvor, ebenfalls die gemittelten Schnittlinien der 36 Parametervariationen verwendet, um Prozessschwankungen zu glätten. Um einen mittleren Wert der Kathodenblätter zu erhalten, werden anstelle der Schnittlinien bei $y_E = 130 \text{ mm}$ die Schnittlinien bei $y_E = 70 \text{ mm}$ ausgewertet. Jede ausgewertete gemittelte Schnittlinie besteht dabei aus fünf bis zehn vermessenen Kathodenblätter entsprechend Tabelle 0-1 im Anhang. Von diesen Schnittlinien werden anschließend die

Maxima ermittelt. Zunächst wird die Auswertung der Seite A nach Aktivmaterial und Massenbeladung gruppiert und über den Verdichtungsgrad aufgetragen, s. Abbildung 5-28.

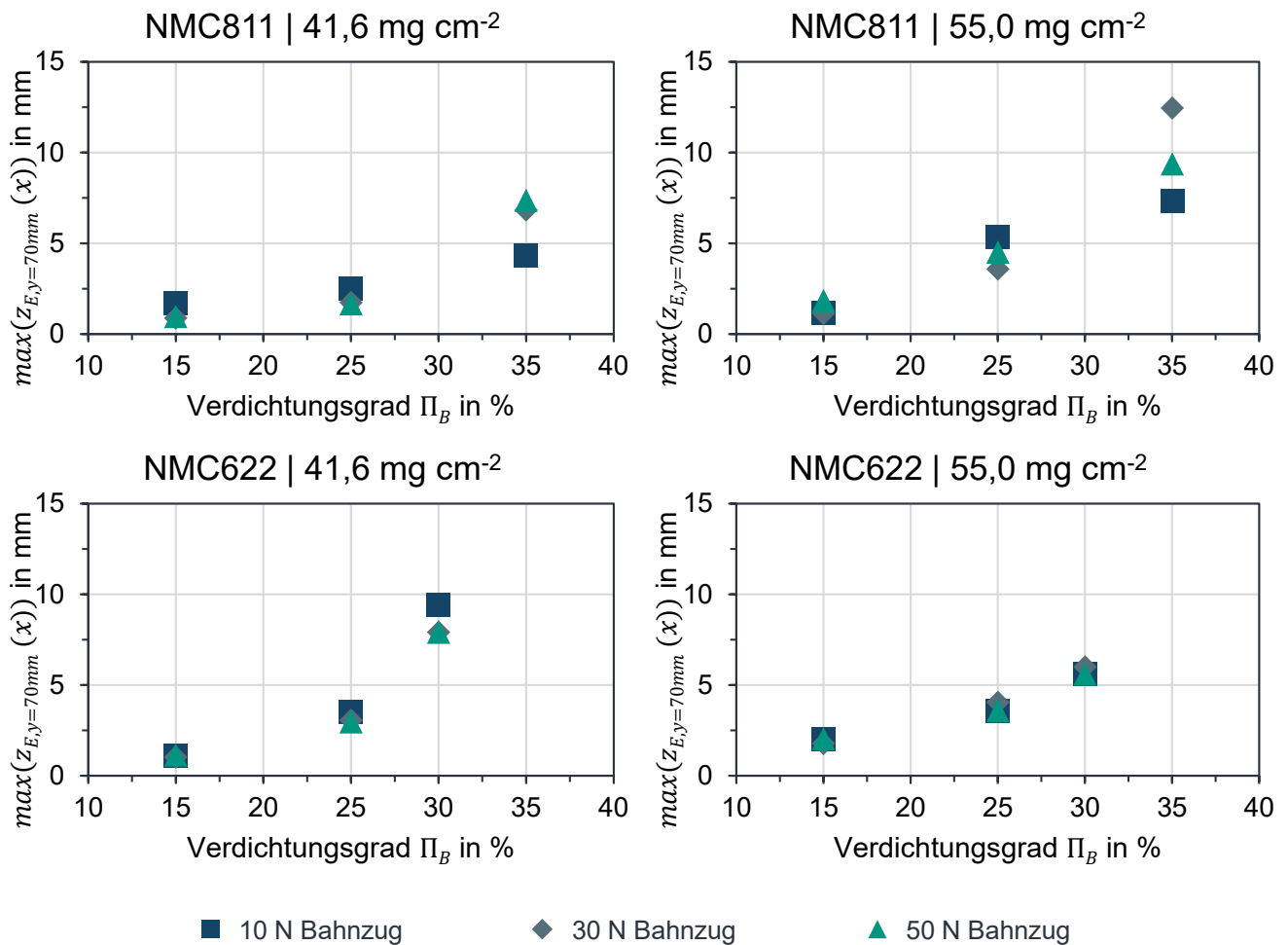


Abbildung 5-28: Durchschnittliche Maxima jeder kalandrierten Parameterkonfiguration ausgewertet in Schnittlinie $y_E = 70$ mm auf Seite A des Blattes aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbeladung

Da die einzelnen Messungen für den jeweiligen Verdichtungsgrad nahe beieinander liegen, wurde die Standardabweichung aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in das Diagramm eingetragen. Im Mittel beträgt die Standardabweichung bei $\Pi_B = 15$ % 0,287 mm, bei $\Pi_B = 25$ % 0,568 mm und bei $\Pi_B = 30$ % bzw. $\Pi_B = 35$ % 1,399 mm. Es zeigt sich, dass der Verdichtungsgrad einen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung der Maxima besitzt. Bei $\Pi_B = 15$ % bewegt sich das Maximum des Kathodenblatts bei bis zu 2,04 mm, über alle Aktivmaterialien, Massenbeladung und Bahnzüge in etwa gleichbleibend. Bei $\Pi_B = 35$ % variieren die Maxima mit 4,31 mm bis 12,46 mm

stärker, allerdings ist dort auch die Standardabweichung stärker ausgeprägt. Es ist ersichtlich, dass die Ursache in der Biegesteifigkeit der Kathode begründet liegt. Durch das viskoelastische Verhalten nimmt sie zunächst die Form des Coils während der Lagerung an. Nach der Vereinzelnung und der Platzierung auf den Tisch sinken die Kanten durch das Eigengewicht nach unten, bis das Kräftegleichgewicht erreicht ist. Je stärker die Kathode kalandriert wurde, desto höher ist nach (Haselrieder 2017, S. 165) deren Steifigkeit und somit auch die Ausprägung der Maxima.

Die Auswertung der Haupteffekte bestätigt den großen Einfluss des Verdichtungsgrads. Dem entgegen stehen die Effekte der drei weiteren Einflussfaktoren Aktivmaterial, Massenbeladung und Bahnzug, deren Effekte sich kaum auf die Maxima auswirken, s. Abbildung 5-29.

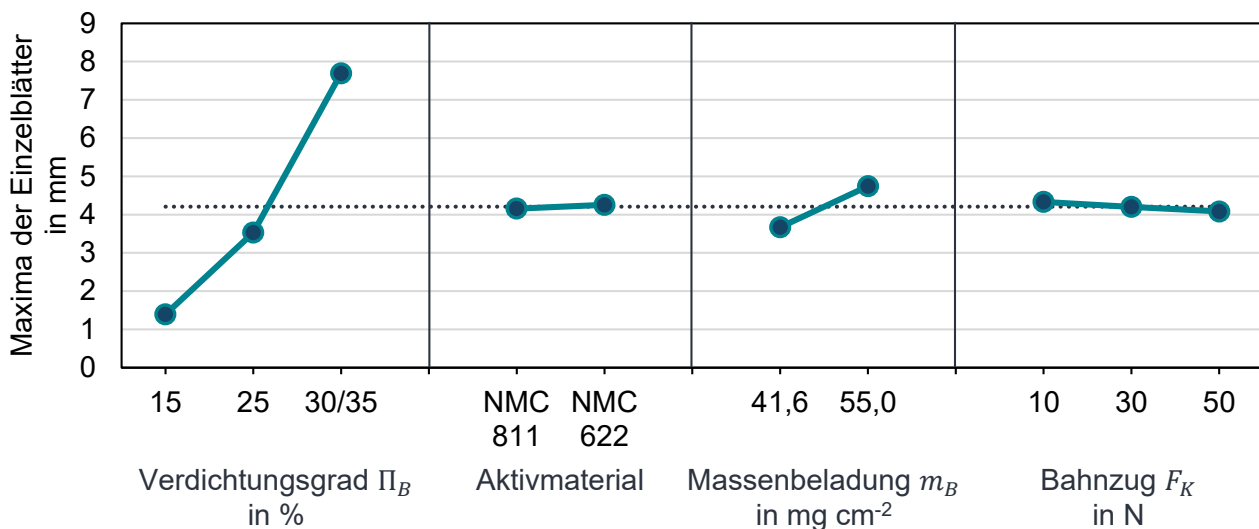


Abbildung 5-29: Haupteffektediagramm der vier Einflussfaktoren Verdichtungsgrad, Aktivmaterial, Massenbeladung und Bahnzug bei **Seite A**

Für die Auswertung der Seite B wird analog zu Seite A die aus fünf bis zehn vermessenen Kathodenblätter gemittelte Schnittlinie $y_E = 70 \text{ mm}$ verwendet und über die Kontur das jeweilige Maxima ermittelt, s. Abbildung 5-30. Die gemittelte Standardabweichung bei $\Pi_B = 15 \%$ beträgt $0,466 \text{ mm}$, bei $\Pi_B = 25 \%$ $0,611 \text{ mm}$ und bei $\Pi_B = 30 \%$ bzw. $\Pi_B = 35 \%$ $0,908 \text{ mm}$.

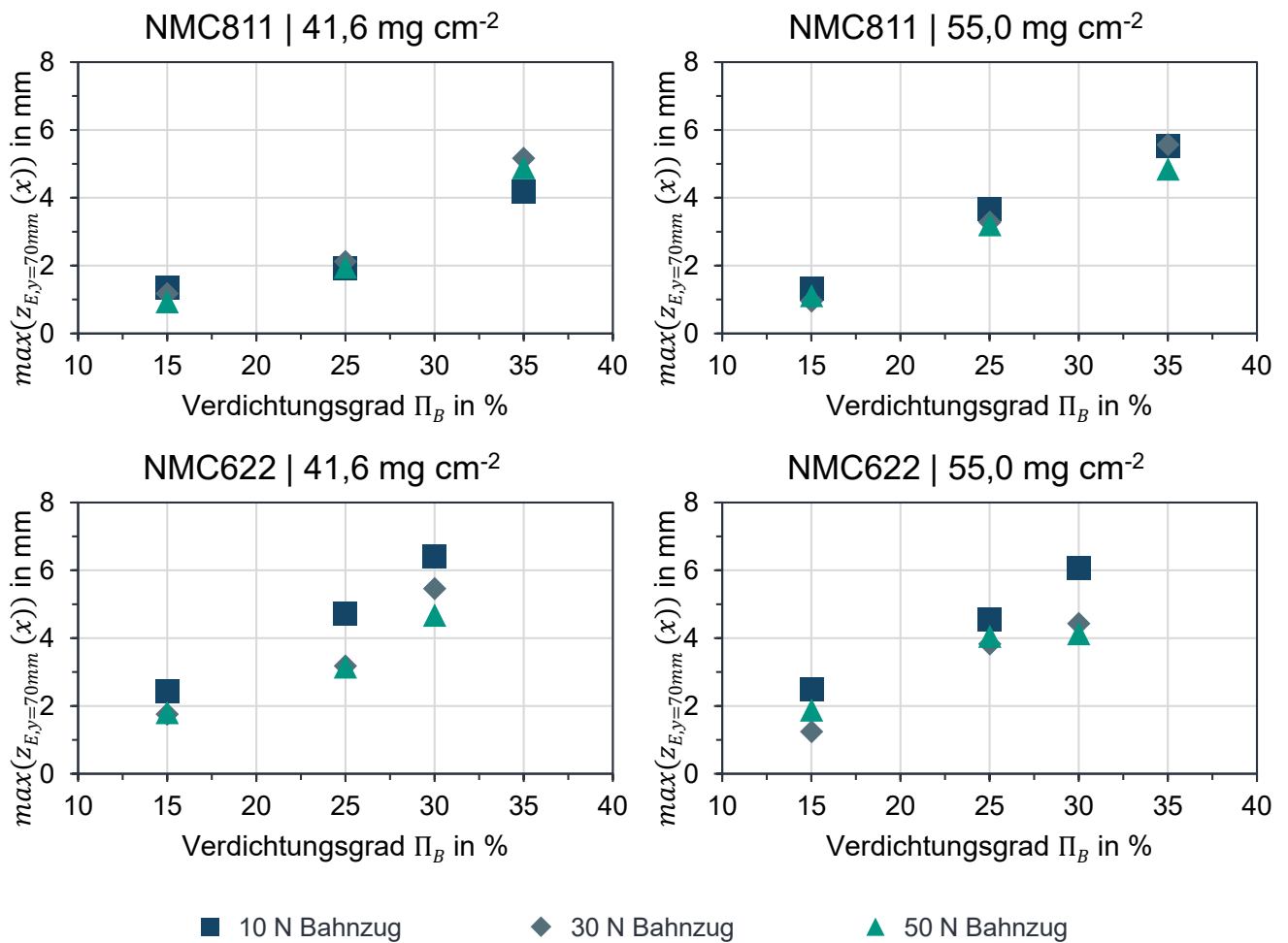


Abbildung 5-30: Durchschnittliche Maxima jeder kalandrierten Parameterkonfiguration ausgewertet in Schnittlinie $y_E = 70 \text{ mm}$ auf Seite B des Blattes aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbelastung nach (Mayer & Schwab et al. 2023)

Bei der Auswertung von Seite B des vereinzelt Kathodenblattes zeigt sich ein ähnliches Bild. Die Maxima zeigen sich abhängig vom Verdichtungsgrad und bewegen sich bei $\Pi_B = 15 \%$ zwischen 0,94 mm bis 2,44 mm und weisen damit einen ähnlichen Bereich wie bei Seite A auf. Bei $\Pi_B = 30 \%$ bzw. $\Pi_B = 35 \%$ beträgt der Bereich allerdings zwischen 4,13 mm und 6,41 mm, was deutlich unter dem Bereich von Seite A liegt. Wie auch bei Seite A liegen die Ursachen für die stärkere Ausprägung der Maxima bei steigendem Verdichtungsgrad in der sich einstellenden Steifigkeit der Beschichtung, s. (Haselrieder 2017, S. 165).

Auch die Betrachtung des Haupteffektdiagramms bestätigt den Eindruck, s. Abbildung 5-31. Der Gesamtmittelwert aller Messungen der Maxima bei Seite B liegt mit 3,32 mm etwa 1 mm unter dem Gesamtmittelwert bei Seite A.

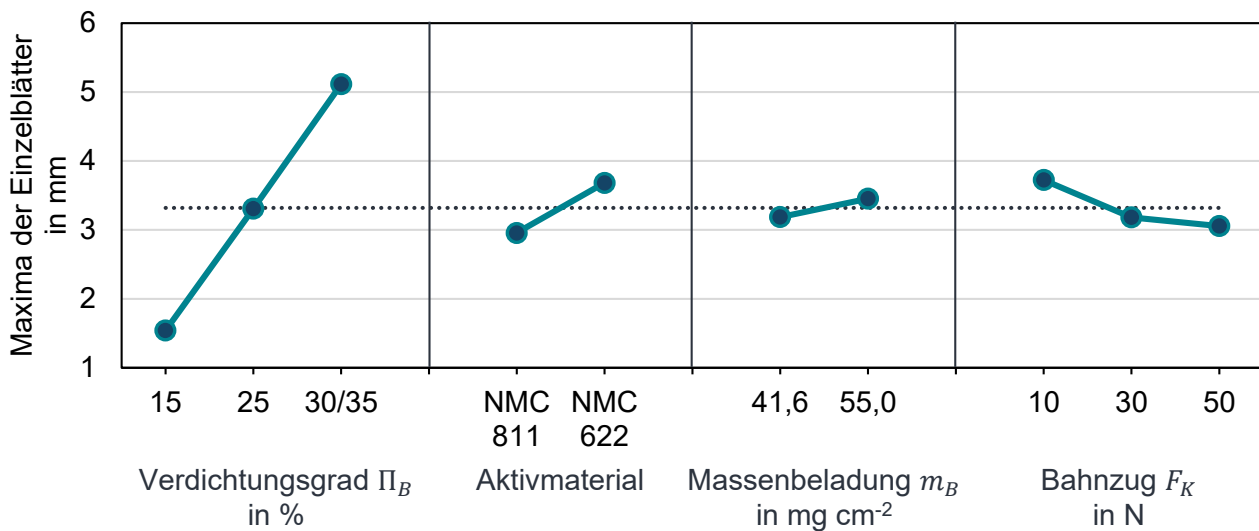


Abbildung 5-31: Haupteffektdiagramm der vier Einflussfaktoren Verdichtungsgrad, Aktivmaterial, Massenbelastung und Bahnzug bei **Seite B**

Die Gründe für den geringeren Mittelwert liegen in der Geometrieausprägung. Sobald das Kathodenblatt auf Seite A liegt, schmiegt es sich an den Tisch an und lediglich die Seitenränder wölben sich nach oben. Es bildet sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der Gewichtskraft des Anteils der Kathodenfläche, der sich an den Seitenrändern vom Tisch abhebt, und der inhärenten Steifigkeit der Kathode.

Wenn die Kathode allerdings auf Seite B auf einen Tisch abgelegt wird, stützt sich zunächst das ganze Eigengewicht auf den beiden Seitenrändern der Kathode ab und sinkt ab, bis sich ebenfalls ein Gleichgewichtszustand ausbildet. Bei Seite B muss jedoch immer das gesamte Eigengewicht abgestützt werden, bei Seite A jeweils an beiden Seitenrändern nur ein Anteil des Kathodenblattes, der weniger als die Hälfte des Blattes beträgt. Somit ist das Maximum bei Seite A tendenziell größer als bei Seite B.

Als weiteren Aspekt lässt sich in Abbildung 5-31 beobachten, dass der Einfluss der weiteren Faktoren Aktivmaterial, Massenbelastung und Bahnzug wie auch bei Seite A nur untergeordnet auf die Maxima der Einzelblätter ist.

Der insgesamt starke Einfluss der Coilbiegung auf die geometrische Ausprägung des Einzelblatts in Verbindung mit dem viskoelastischen Materialverhalten der Beschichtung führt zu der Frage, ob eine schnellere Verarbeitung des Coils, also die Verringerung der Dauer im aufgewickelten Zustand, die Einzelblattgeometrie beeinflusst. Dies wird im Folgenden näher untersucht.

5.4.3 Zeitlicher Einfluss der Coillagerung auf das Einzelblatt

Die Beobachtung der vereinzelt Kathodenblätter zeigt, dass die Lagerung der Kathodenbahnen auf den Coils einen Einfluss auf die geometrische Form der Einzelblätter hat. Aufgrund der Vielzahl an Experimenten und Prozessschritten sowie der damit verbundenen Verfügbarkeit der Anlagen- und Messtechnik lagen zwischen der Kalandrierung der Kathoden und deren Vereinzelung zwischen 2 bis 10 Wochen, s. Tabelle 5-6.

Tabelle 5-6: Lagerzeiten der auf Coils aufgewickelten Kathoden der durchgeführten Kalandrierversuche vor der Vereinzelung nach (Mayer & Schwab et al. 2023)

Parameter in -; mg cm ⁻² ; N; N; N	Lagerzeit in Wochen nach Verdichtungsgrad Π_B			
	15 %	25 %	30 %	35 %
NMC811; 41,6; 10, 30, 50	5	5	-	2
NMC811; 55,0; 10, 30, 50	10	10	-	10
NMC622; 41,6; 10, 30, 50	5	5	5	-
NMC622; 55,0; 10, 30, 50	7	7	6	-

Zur Untersuchung des Einflusses der Coillagerzeit auf die geometrische Form der Einzelblätter wurden ausgewählte Versuche wiederholt. Einzig die Zeit zur Herstellung und Vermessung der Einzelblätter wurde signifikant reduziert. Die Versuchsdurchführung wurde so geplant, dass direkt im Anschluss an die Kalandrierung die Kathoden vereinzelt und vermessen wurden, sodass zwischen Kalandrierung und Vermessung nicht mehr als 24 Stunden liegen. Da der Verdichtungsgrad den stärksten Einfluss auf die Welligkeiten und die auftretende Coilbiegung hat, wurde dieser variiert, die anderen Parameter konstant gehalten. Tabelle 5-7 zeigt zusammenfassend die Parameterkonfiguration der durchgeführten Versuche.

Tabelle 5-7: Untersuchte Parameter mit variierenden Coillagerzeiten

Aktivmaterial	Massen- beladung	Verdichtungs- grad	Bahnzug	Coillagerzeit
NMC811	55,0 mg cm ⁻²	15 % 35 %	30 N	10 Wochen
NMC 811	55,0 mg cm ⁻²	15 % 35 %	30 N	<24 h

Zur besseren Visualisierung des Ergebnisses werden nicht die Maxima der Einzelblätter ausgewertet, sondern der Schnittlinienverlauf der vermessenen Einzelblätter wird bei $y_E = 70 \text{ mm}$ gezeigt. Exemplarisch sind in Abbildung 5-32 die Ergebnisse für Seite A dargestellt, die Ergebnisse für Seite B finden sich im Anhang, s. Abbildung 0-1.

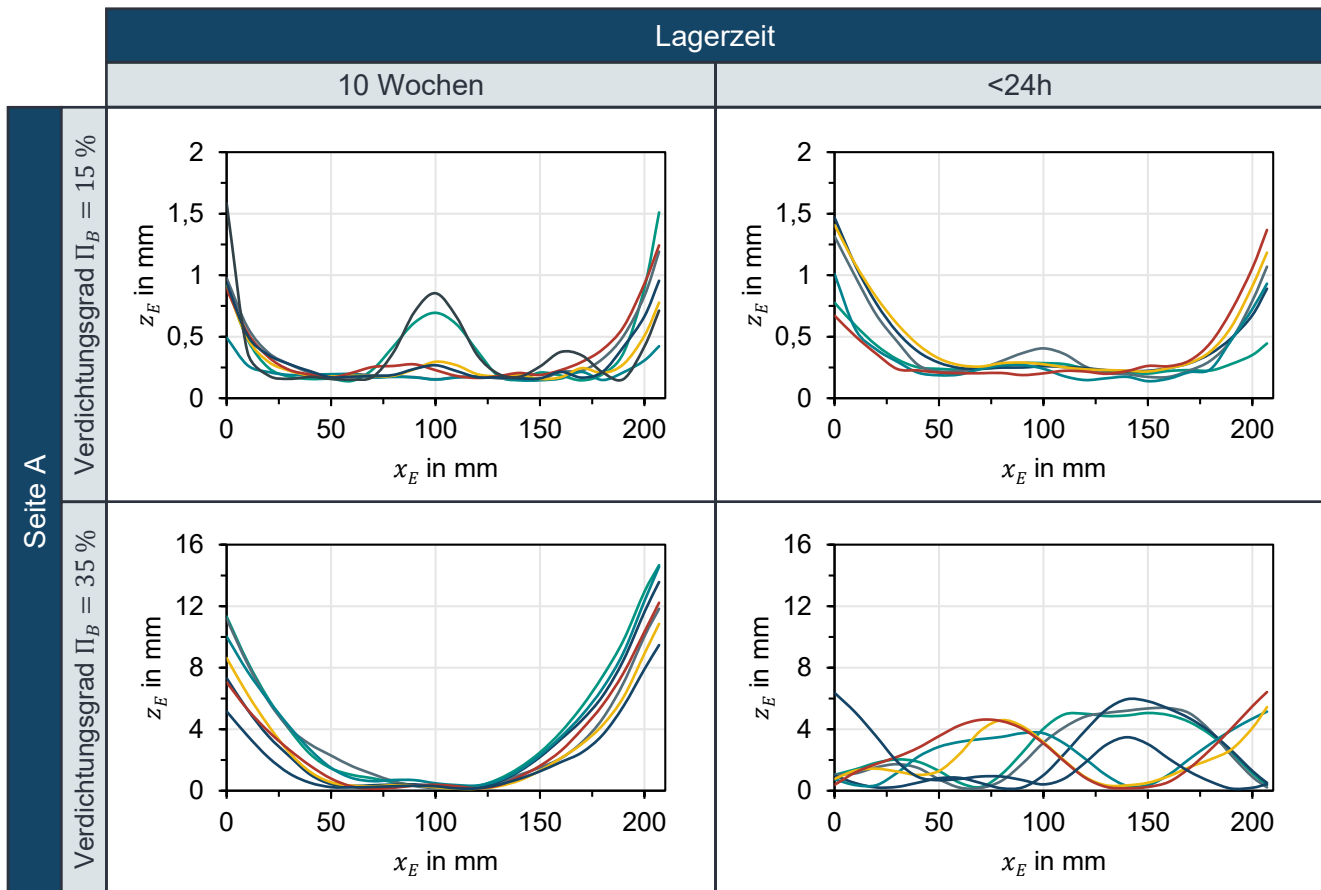


Abbildung 5-32: Einfluss der Coillagerzeit auf die Wölbung der vereinzelt Kathodenblätter anhand der Schnittlinien bei $y_E = 70\text{ mm}$ auf Seite A

Die Messungen zeigen, dass bei einem Verdichtungsgrad von 15 % die Lagerzeit keine Auswirkung auf die Geometrie der Schnittlinie hat. Sowohl bei der längeren als auch bei der kürzeren Lagerzeit wölben sich die Kanten nach oben, sodass bei beiden Konfigurationen die Coilbiegung bei der entsprechenden Auflösung erkennbar ist. Beide Messungen zeigen darüber hinaus kleinere Welligkeiten in der Mitte des Blattes, was, wie in Kapitel 5.4.1 diskutiert, auf die Mittenwelligkeit, aber auch auf den Einfluss der Gravitationskraft auf die Kathodenseiten sowie auf allgemeine Prozessschwankungen zurückgeführt werden kann. Es ist anzumerken, dass bei beiden Messungen eine deutliche Reduktion der Wellenamplitude auftritt. Die DEI_M -Messung nach der Kalandrierung betrug $DEI_M = 2,23\text{ mm}$ (NMC811, $55,0\text{ mg cm}^{-2}$, 15 %, 30 N, Lagerzeit 10 Wochen) bzw. $DEI_M = 2,73\text{ mm}$ (NMC811, $55,0\text{ mg cm}^{-2}$, 15 %, 30 N, Lagerzeit <24 h).

Dem entgegen zeigt sich bei einem Verdichtungsgrad von 35 % eine deutliche Auswirkung der Lagerzeit auf die Geometrie des Kathodenblatts. Bei der 10-wöchigen Lagerung zeigt sich einerseits deutlich die Coilbiegung, andererseits sind jedoch keine Mit-

tenwellen zu beobachten. Bei einer kurzen Lagerzeit hingegen ist der Einfluss der Coilbiegung nicht mehr zu sehen. Vielmehr zeigen sich über die ganze Länge des Kathodenblatts Welligkeiten, die stark an die Mittenwellen nach der Kalandrierung erinnern. Bei dem Vergleich mit der Auswertung des DEI_M zeigt sich bei NMC811, 55,0 mg cm⁻², 15 %, 30 N, Lagerzeit 10 Wochen keine Ähnlichkeit mit dem bei der Kalandrierung des gleichen Materials gemessenen $DEI_M = 5,23 \text{ mm}$. Bei NMC811, 55,0 mg cm⁻², 15 %, 30 N, Lagerzeit <24 h hingegen ist der gemessene Wert von $DEI_M = 6,30 \text{ mm}$ sehr nahe an der Ebenheitsabweichung der Einzelsheets. Es kann somit angenommen werden, dass bei einer starken Kalandrierung und einer kurzen Lagerzeit die Mittenwellen in die Einzelblätter fortgepflanzt werden.

Die Gründe für die zu beobachtenden Effekte der Coilbiegung bei der geringen Verdichtung sind darauf zurückzuführen, dass bereits bei der Aufwicklung nach der Kalandrierung kleine plastische Verformungen in die Kathode eingebracht werden, die später auch für das Abheben der Seiten verantwortlich sind. Die Steifigkeit des Materials ist relativ gering, sodass im aufgewickelten Zustand die induzierten Spannungen in der Beschichtung ebenfalls gering ausfallen. Der viskoelastische Effekt der Spannungsrelaxation findet zwar statt, allerdings ist er durch die geringen Spannungen nur wenig ausgeprägt, weswegen kein nennenswerter Unterschied zwischen den Lagerzeiten auffällt.

Bei der starken Verdichtung hingegen besitzt die Beschichtung eine größere Steifigkeit. Zuzüglich zur plastischen Verformung bei der Aufwicklung werden Zug- bzw. Druckspannungen in die Beschichtung eingebracht. Bei langer Lagerzeit auf dem Coil relaxieren die Spannungen, wodurch die Mitten- und Randwellen nicht mehr zu sehen sind. Wird jedoch die Kathode schnell abgewickelt und vereinzelt, so findet die Spannungsrelaxation nicht bzw. nur in geringem Maße statt. Die Mittenwellen sind deutlich zu sehen.

Im Hinblick auf die Lagerzeit kann darüber hinaus sowohl für die stark als auch für die schwach kalandrierten Kathoden nicht ausgeschlossen werden, dass auch chemische Veränderungen des Materials eine Rolle spielen. Feuchtigkeits- und Temperatureinflüsse konnten aufgrund der gegebenen Laborbedingungen nicht vermieden bzw. konstant gehalten werden, weswegen dies zwar ein Einflussfaktor sein kann, allerdings nicht untersucht werden konnte.

Im Hinblick auf die Randwellen werden diese bei geringeren Verdichtungsgraden sowohl bei kurzer als auch bei langer Lagerzeit nicht immer im Einzelblatt fortgepflanzt. Bei dem Verdichtungsgrad von 35 % zeigt sich jedoch, dass, wenn Randwellen sichtbar sind, diese sich deutlich stärker nach einer kurzen Lagerzeit im Einzelblatt zeigen als bei einer langen Lagerzeit. In Abbildung 5-33 ist exemplarisch Seite A und Schnittlinie $y_E = 130 \text{ mm}$ sowohl mit kurzer als auch mit langer Lagerzeit zu sehen.

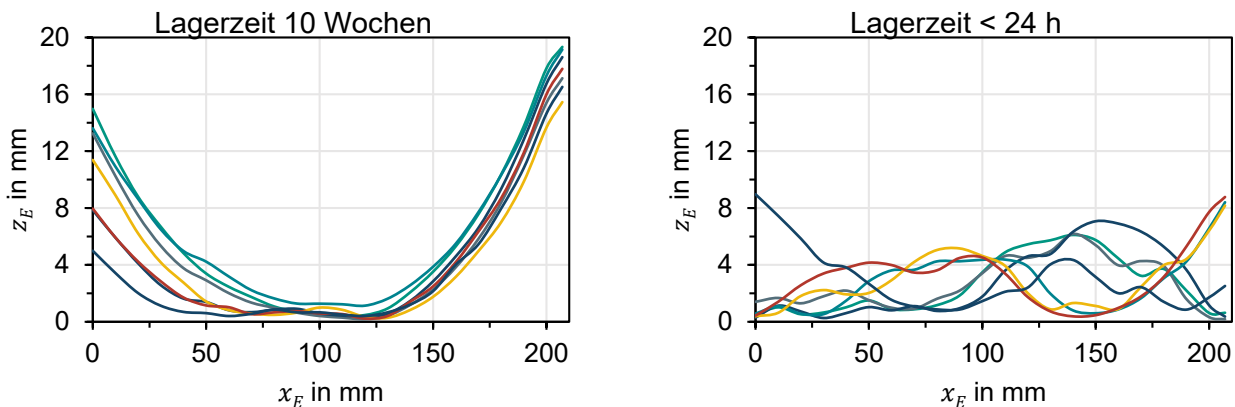


Abbildung 5-33: Auswirkung der Lagerzeit auf die Randwellen bei der Schnittlinie $y_E = 130 \text{ mm}$ für eine Verdichtung von $\Pi_B = 35 \%$ auf Seite A der Einzelblätter

Die Ergebnisse aus Abbildung 5-33 stärken die Beobachtung aus Abbildung 5-32, so dass sowohl bei den Rand- als auch bei den Mittenwellen angenommen werden kann, dass diese sich bei schneller Verarbeitung in das Einzelblatt fortpflanzen.

Es zeigt sich, dass der Zeitfaktor bei der Verarbeitung der Materialien relevant ist. Im Hinblick auf eine industrielle Verarbeitung ist die Coillagerung tendenziell kürzer als in Laboranwendungen. Je nach Nachtrocknungsverfahren und der zugehörigen Prozessführung kann von einer Lagerung der Coils von bis zu 24 h ausgegangen werden (Weiss Technik GmbH 2024)¹², sodass der Anwendungsfall einer Lagerzeit von < 24 h als industriell relevanter betrachtet werden kann.

Fazit Kapitel 5

Bei der Kalandrierung von Kathoden treten prozessbedingt Mitten- und Randwellen auf. Je stärker der Verdichtungsgrad der Kathoden ist, desto stärker bilden sich auch die Amplituden der Wellen aus. Der DEI_M der Mittenwellen bewegt sich bei einem

¹² Weiss Technik GmbH (2024), *Optimierung in der Batterieproduktion. Restfeuchte flexibel auf ein Minimum reduzieren.* <https://www.weiss-technik.com/de/aktuelles/detail/optimierung-in-der-batterieproduktion~n35078> [11.02.2024].

Verdichtungsgrad von $\Pi_B = 15\%$ bis $\Pi_B = 30\%$ bzw. $\Pi_B = 35\%$ im Bereich von etwa 1,34 mm bis 7,00 mm. Der DEI_R der Randwellen hingegen zwischen 0,76 mm und 5,93 mm, wobei hier die Wellenlänge deutlich geringer ist.

Die Welligkeiten sowie die Art der Verarbeitung der Kathode führen zu Geometrieabweichungen in Form von Längen- und Breitenmaßschwankungen sowie Ebenheitsabweichungen in den vereinzelt Kathodenblättern. Längen- und Breitenmaßschwankungen sind in der Literatur bereits untersucht und schwanken bis zu $\pm 0,375$ mm. Ebenheitsabweichungen zeigen sich im Einzelblatt in Form der fortgepflanzten Mitten- und Randwellen aus dem Kalandrierprozess sowie in der Biegung des Einzelblattes aufgrund der Coilaufwicklung und -lagerung. Das Zusammenspiel zwischen den Einflüssen ist dabei abhängig vom Verdichtungsgrad bei der Kalandrierung sowie von der Dauer der Aufwicklung auf dem Coil. Je länger die Kathode aufgewickelt war, desto dominanter ist die Coilbiegung. Bei einer Coillagerzeit unter 24 h hingegen bilden sich die Mitten- und Randwellen insbesondere bei hohen Verdichtungsgraden deutlich aus, während die Coilbiegung nur einen geringen Einfluss hat. Die gemessenen mittleren Ebenheitsabweichungen in den Einzelblättern bewegen sich dabei bei der Schnittlinie $y_E = 70$ mm und einem Verdichtungsgrad von 15 % zwischen 0,89 mm und 2,44 mm und bei einem Verdichtungsgrad von 30 % bzw. 35 % zwischen 4,13 mm und 12,46 mm.

Es lässt sich festhalten, dass durch die durchgeführten experimentellen Untersuchungen die Forschungsfrage hinsichtlich des Einflusses der Kalandrierung auf die Geometrie der vereinzelt Elektrodenblätter beantwortet werden konnte.

Für die weitere Prozessierung der vereinzelt Kathodenblätter stellt sich insbesondere bei der Einzelblattstapelbildung die Frage, welchen Einfluss die Ebenheitsabweichungen sowie die Längen- und Breitenmaßschwankungen auf die resultierende Stapelgenauigkeit haben. Dies wird im folgenden Kapitel experimentell untersucht.

6 Experimentelle Untersuchung der Einzelblattstapelbildung

Nachdem in Kapitel 5 ausgewählte Aspekte der Geometrie der vereinzelt Kathodenblätter untersucht wurden, soll in Kapitel 6 der Einfluss der Kathodenblattgeometrie auf die Stapelgenauigkeit experimentell untersucht werden, s. Abbildung 6-1.

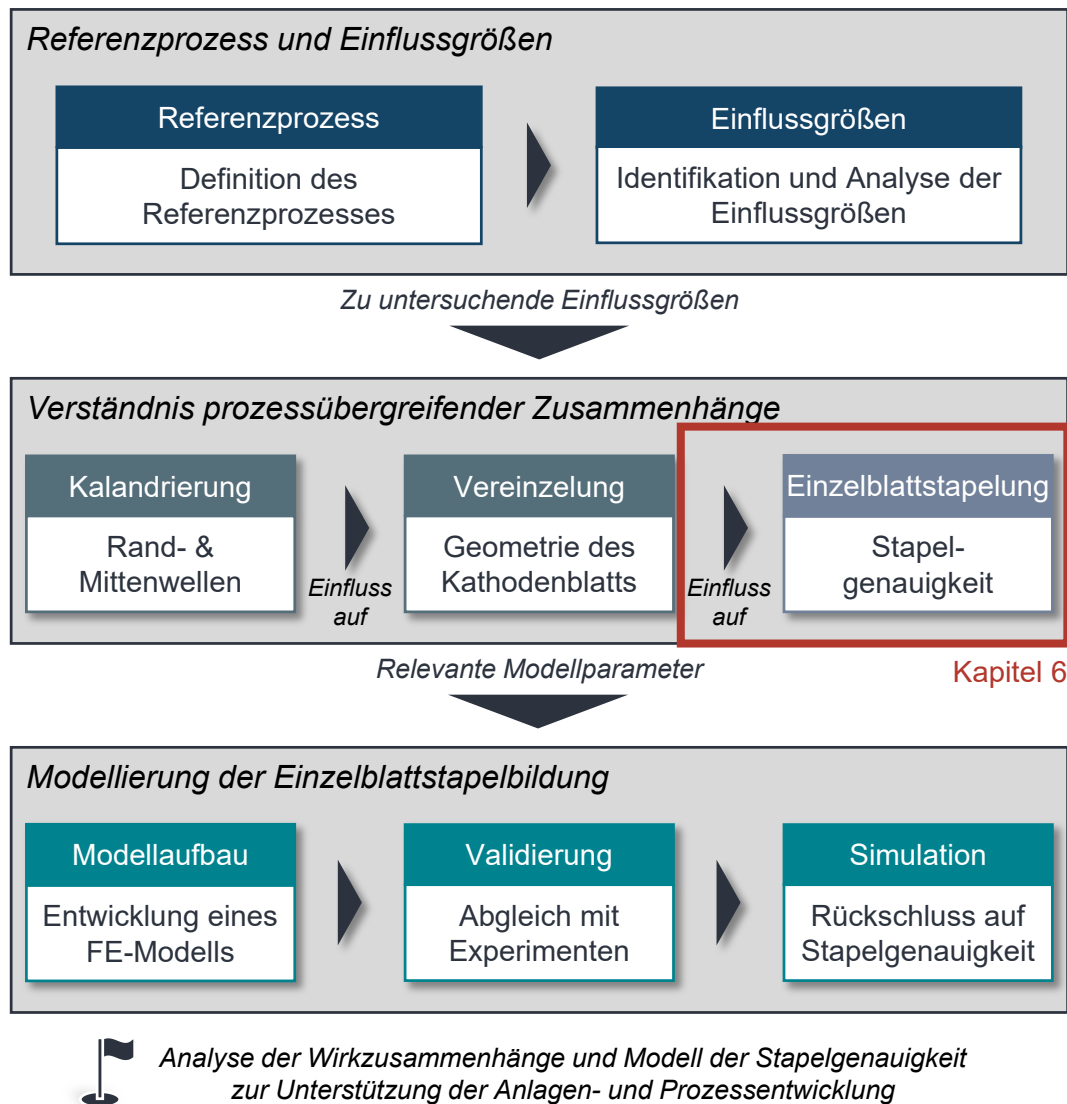


Abbildung 6-1: Einordnung von Kapitel 6 in das Zielbild der Arbeit

Zur Untersuchung der notwendigen Parameter und Zielgrößen wird in Kapitel 6.1 ein Versuchsstand für den in Kapitel 4.1.2 definierten Referenzprozess entwickelt, anhand dessen in Kapitel 6.2 die Versuchsplanung durchgeführt wird. Entsprechend der Untergliederung des Referenzprozesses wird die Einzelblattstapelbildung in die einzelnen

Prozessmodule zerlegt, sodass in Kapitel 6.3 zunächst die Ergebnisse des Geometrieinflusses auf den Ausricht- und Greifprozess diskutiert werden. In Kapitel 6.4 folgt die Diskussion des Einflusses des Handhabungsprozesses. Der Ablageprozess mit Niederhalter-Greifer-Interaktion wird aufgrund des Untersuchungsumfangs in zwei Teile aufgespalten, sodass in Kapitel 6.5 zunächst die Ergebnisse der Ablage der Kathodenblätter auf den Stapel diskutiert werden und in Kapitel 6.6 abschließend die Ergebnisse der Niederhalter-Greifer-Interaktion innerhalb des Stapels.

6.1 Entwicklung eines Versuchsstands

Für die detaillierte Untersuchung der Prozessabschnitte in der Einzelblattstapelbildung wird entsprechend dem in Kapitel 4.1.2 definierten Referenzprozess ein spezieller Versuchsstand entwickelt. Gründe hierfür sind zum einen, dass in den Laboratorien des Instituts keine dem Referenzprozess entsprechende Anlagentechnik für die Einzelblattstapelbildung zur Verfügung stand und zum anderen auch spezielle Anforderungen, wie etwa die Zugänglichkeit für das verwendete Messgerät, gewährleistet sein müssen. Die Entwicklung und Konstruktion sowie der mechanische und steuerungstechnische Aufbau des Prüfstands wurden im Rahmen der vom Autor angeleiteten Abschlussarbeiten (A_Freyd 2022; A_Fuchs 2023; A_Kaiser 2022) durchgeführt. Entsprechend der Vorgehensweise in (A_Kaiser 2022) wird der Versuchsstand in Anlehnung an die VDI-Norm 2221 entwickelt, s. Abbildung 6-2.

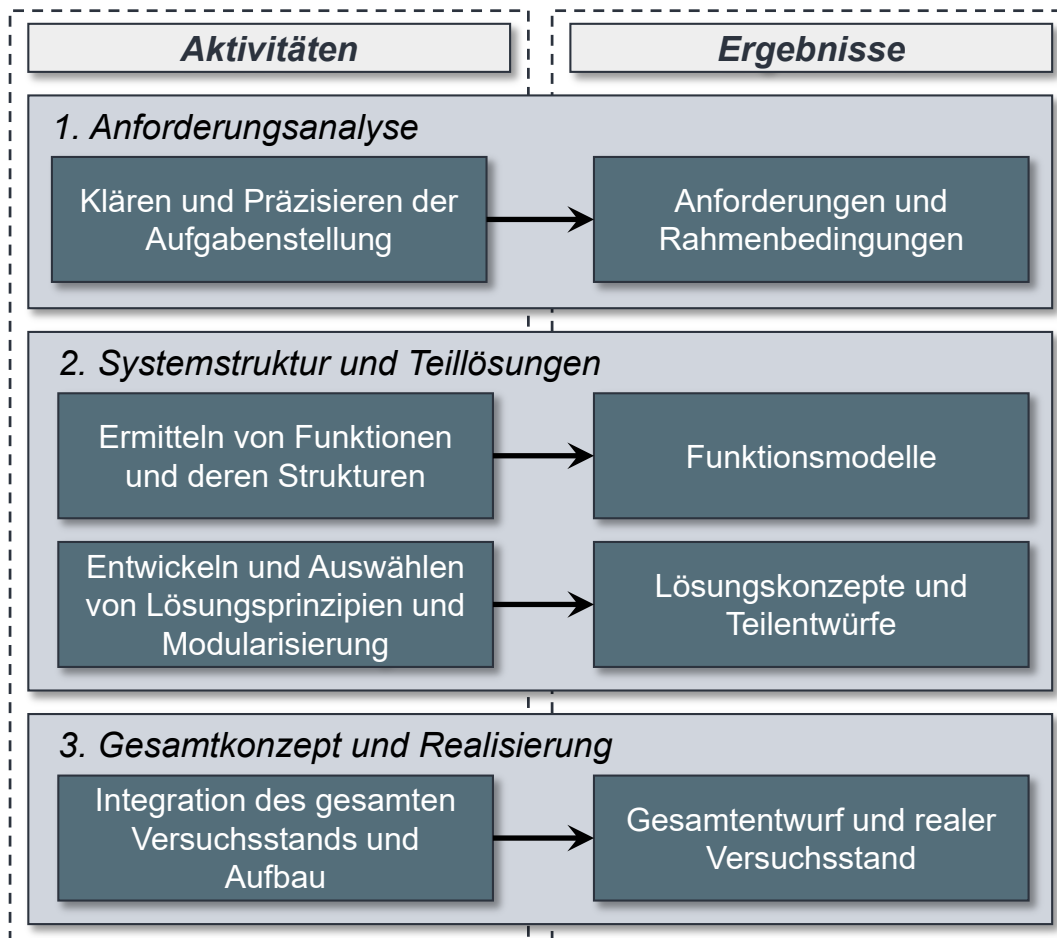


Abbildung 6-2: Vorgehen zur Entwicklung des Versuchsstands in Anlehnung an (VDI 2221 Blatt 1)

6.1.1 Anforderungsanalyse

Entsprechend der VDI-Norm 2221 werden zunächst Anforderungen und Rahmenbedingungen abgeleitet, auf Basis dessen konstruktive Lösungen entwickelt und bewertet werden können. Die in (A_Kaiser 2022) erarbeiteten sowie teilweise leicht aktualisierten Anforderungen werden in die von (Bender & Gericke 2021, S. 195) vorgeschlagene Gliederung überführt, wobei für den vorliegenden Anwendungsfall sinnvollerweise nicht alle dort aufgeführten Aspekte berücksichtigt werden. Jede Anforderung wird einer Kategorie zugeordnet, um eine entsprechende Priorisierung durchzuführen. Nach (Ponn & Lindemann 2011, S. 50) können diese in Forderungen und Wünsche (W) unterteilt werden, wobei sich die Forderungen wiederum in Festforderungen (F) und Bereichsforderungen (B) aufteilen lassen. Die erarbeiteten Anforderungen sowie deren Kategorisierung sind in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Anforderungen an den Versuchsstand in Anlehnung an (A_Kaiser 2022) und (Bender & Gericke 2021, S. 195)

Nr.	Bezeichnung	Kategorie
A	Gebrauch	
A ₁	Funktion: Ausrichten und Greifen der Kathoden	F
A ₂	Funktion: Handhabung der Kathoden vom Ausrichten zum Stapeln	F
A ₃	Funktion: Stapeln und Niederhalten der Elektroden	F
B	Stoff und Energie	
B ₁	Verwendung industrienaher Werkstoffe	F
B ₂	Vorhandene Energieversorgung nutzen (Druckluft, Strom)	B
B ₃	Filterung verwendeter Druckluft bei Kathodenkontakt	F
C	Signal	
C ₁	Manuelle Steuerung einzelner Prozessabschnitte ermöglichen	F
D	Geometrie	
D ₁	Adaption der Funktionen auf die Referenzbatteriezellgeometrie	F
D ₂	Integration der Funktionen in einen Prüfstand ohne Wechselmodule	W
D ₃	Minimaler Flächenbedarf	W
E	Mechanik	
E ₁	Hohe Wiederholgenauigkeit	B
E ₂	Robustheit gegenüber Erschütterungen	B
E ₃	Beschädigungsfreies Greifen und Niederhalten der Komponenten	F
E ₄	Geringe Anzahl an Bewegungsachsen	W
F	Elektrik	
F ₁	Verwendung des bestehenden Labornetzteils	W
G	Software	
G ₁	Verwendung von Open Source Software zur Steuerung	W
H	Kontrolle	
H ₁	Vermessung der einzelnen Prozesse mit GOM ATOS Core 135	F

Für die Zweckerfüllung des Versuchsstands müssen zunächst die drei Prozessschritte Ausrichten und Greifen, Handhabung sowie Stapeln und Niederhalten entsprechend dem Referenzprozess durchführbar sein (A₁-A₃). Diese sind als Festforderungen kategorisiert. Die verwendeten Werkstoffe müssen so ausgewählt werden, wie sie auch in industriellen Anwendungen verwendet werden, um eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können (B₁). Bei der Energieversorgung mit Druckluft oder Strom muss die vorhandene Infrastruktur genutzt werden, sodass sich Druckluftapplikationen im Bereich von bis zu 6 Bar Luftdruck und Stromapplikationen mit bis zu 230 V und 16 Ampere bewegen können (B₂). Als weitere Festforderung ist die Filterung der Druckluft mit einem geeigneten Filter nach Kathodenkontakt notwendig, da eine Kontamination mit Partikeln des Elektrodenmaterials nicht ausgeschlossen werden kann und diese nicht in die Umgebung abgegeben werden dürfen (B₃). Dies betrifft insbesondere die notwendige

Greifapplikation. Für die Steuerung des Versuchsstands muss sichergestellt werden, dass die drei Prozessschritte unabhängig voneinander angesteuert werden können, da diese jeweils separat untersucht werden sollen (C_1). Weiterhin muss die Geometrie des Versuchsstands sicherstellen, dass die verwendete Referenzbatterie zelle verarbeitbar ist (D_1). Wünschenswert ist die Integration der drei Prozessschritte in der Art, dass keine Module aus dem Versuchsstand genommen werden müssen, sodass eine schnellere Versuchsdurchführung ermöglicht wird (D_2), was allerdings im Gegensatz zu dem Wunsch nach einem geringen Flächenbedarf steht (D_3). Ein wichtiger Aspekt ist die zu verwendende Mechanik, da hier hohe Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden müssen. So besteht zunächst die Bereichsforderung nach einer hohen Wiederholgenauigkeit des Versuchsstands. (Weinmann 2022, S. 47) gibt als geringsten Wert für die Stapelgenauigkeit $\pm 0,15$ mm an. Um in diesen Bereichen sinnvolle Messungen durchführen zu können, wird die Anforderung an die Wiederholgenauigkeit in den Bereich $\pm 0,01$ mm gesetzt (E_1). Die hohe Präzision erfordert eine Robustheit des Versuchsstands gegenüber möglichen Erschütterungen, beispielsweise dem Vorbeilaufen einer Person, was im Regelbetrieb möglich ist. Für diese Anforderung wird daher definiert, dass in jeglicher Pose des Versuchsstands keine messbare Verschiebung der Elektroden oder des Stapels bei einer vorbeilaufenden Person auftreten darf (E_2). Für eine industrierelevante Untersuchung der Prozesse gehört weiterhin das beschädigungsfreie Greifen und Niederhalten der Elektroden, was als Festforderung definiert wird (E_3). Im Bereich der Mechanik wird zuzüglich die Wunschforderung gesetzt, dass eine möglichst geringe Anzahl an Bewegungsachsen eingesetzt wird (E_4). Jede Achse und insbesondere gekoppelte Bewegungen können mögliche Ungenauigkeiten in das System einbringen bzw. erhöhen den Aufwand für die Erzielung einer hohen Wiederholgenauigkeit. Zusätzlich werden hinsichtlich der Elektronik die Wünsche formuliert, ein bereits vorhandenes Labornetzteil zu nutzen (F_1) sowie hinsichtlich der Steuerungssoftware Open Source Lösungen zu bevorzugen (G_1). Abschließend muss am Versuchsstand räumlich die geometrische Vermessung der einzelnen Prozessschritte mittels des Messgeräts GOM ATOS Core 135 ermöglicht werden, um den Versuchsstand sinnvoll nutzen zu können. Als zentraler Aspekt zur Nutzung des Versuchsstand wird dies als Festforderung definiert (H_1). Darüber hinaus gibt es weitere Anforderungen wie beispielsweise der sichere Betrieb der Anlage, im Allgemeinen die Kostenminimierung oder auch ergonomische Aspekte. Aufgrund der Übersichtlichkeit und Fokussierung

sind diese hier nicht explizit genannt, sind aber im Allgemeinen als Grundlage der Entwicklung technischer Produkte zu sehen.

6.1.2 Systemstruktur und Teillösungen

Bei der Entwicklung der Systemstruktur kann nahtlos an die in Kapitel 4.1 durchgeführte Funktionen- und Systemanalyse und den definierten Referenzprozess angeknüpft werden. Insbesondere der Referenzprozess beschreibt bereits die Kernfunktionen, sodass für diese abstrahierte Funktionsmodelle bestehen. Auf dieser Basis lässt sich das System in einzelne Teilfunktionen strukturieren. So ist für das Ausrichten ein Tisch mit vier Schiebern und einer zugehörigen Aktorik zu entwickeln, die zeitgleich die Schieber zur Tischmitte bewegt und in der gewünschten Position zur Ruhe kommt, um das Elektrodenblatt zu positionieren. Weiterhin ist eine Handhabungseinrichtung notwendig, die die Elektroden greifen kann sowie eine Relativbewegung von der Ausrichtung zu einer Stapleinrichtung realisieren kann. Die Handhabungseinrichtung besteht somit aus einer Bewegungskinematik sowie einem entsprechenden Greifer. Dem folgend ist ein Tisch für die eigentlich Stapelbildung notwendig, an dem Niederhalter für die Stapelfixierung enthalten sind sowie die zugehörige Aktorik, die die Niederhalter im Wechselspiel mit dem Greifer verfahren lassen. Ergänzend besteht das System aus einem Gestell, das entsprechend den Anforderungen robust gegenüber äußerer Erschütterung ist. Nicht zuletzt muss eine geeignete Steuerung entwickelt werden, die die einzelnen Systembestandteile steuert.

Zur systematischen Entwicklung einer Gesamtlösung durch Zusammensetzen einzelner Teillösungen eignen sich morphologische Kästen (Kirchner 2020, S. 163–169). Hierfür werden für die einzelnen Teilfunktionen zeilenweise mehrere Lösungsmöglichkeiten entwickelt und tabellarisch dargestellt. Durch vertikale Kombination einzelner Teillösungen ergeben sich Konzepte für die Gesamtlösung. Der entwickelte morphologische Kasten sowie die vertikale Kombination der ausgewählten, gelb markierten Lösungen finden sich in Abbildung 6-3. (A_Kaiser 2022; Kirchner 2020, S. 163–169)

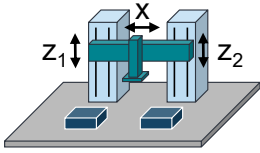
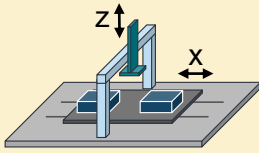
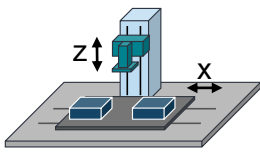
Funktionsmodule		Teillösungen		
Ausrichttisch mit Schieber	Schieber-aktorprinzip (einachsige Bewegung)	Pneumatische Aktorik	Elektromechanische Aktorik	Manuelle Aktuierung
	Mechanische Schieber-ansteuerung	Eigene Aktuierung pro Schieber		Mechanische Kopplung der vier Schieber
Greifer		Vakuum-Sauggreifer	Bernoulli-Greifer	Niederdruck-flächengreifer
Bewegungs-kinematik	Achs-anordnung	Achsportal mit festem Tisch 	Portal mit beweglichem Tisch 	Ständer mit beweglichem Tisch 
	Aktorprinzip	Pneumatische Aktorik	Elektromechanische Aktorik	Manuelle Aktuierung
Stapeltisch mit Niederhalter	Niederhalter-aktorprinzip (zweiachsige Bewegung)	Pneumatische Aktorik	Elektromechanische Aktorik	Manuelle Aktuierung
	Mechanische Niederhalter-ansteuerung	Eigene Aktuierung pro Niederhalter		Mechanische Kopplung der vier Niederhalter
Gesamtanlagensteuerung		SPS-Steuerung	NC-Steuerung	Raspberry Pi
Gestell		Geschweißtes Stahlgestell	Aluminiumprofile mit Aufbauplatten	Gussgestell

Abbildung 6-3: Morphologischer Kasten mit möglichen und ausgewählten Teillösungen in Anlehnung an (A_Kaiser 2022)

Im Rahmen der Abschlussarbeit (A_Kaiser 2022) wurden verschiedene Gesamtkonzepte entwickelt und bewertet, woraus die hier dargestellte bestgeeignete Lösung ausgewählt wurde. Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden in Kapitel 6.1.2.1–6.1.2.4 die Überlegungen und Bewertungsbeweggründe in Anlehnung an (A_Kaiser 2022) dargestellt.

6.1.2.1 Ausrichttisch mit Schieber

Der Referenzprozess wurde so definiert, dass sich alle vier Schieber zur Tischmitte bewegen und nicht ein oder zwei Schieber stationär als Anschlag für die auszurichtende Elektrode dienen. Die Schieber müssen demnach so entwickelt werden, dass sie nach Abschluss der Bewegung in der definierten Position des Nennmaßes verbleiben. Für

die vier Schieber kann der Ausrichttisch selbst als Anschlag dienen, sodass die finale Position mechanisch definiert ist. Zuzüglich muss der Weg, den die Schieber zurücklegen, für alle Schieber synchronisiert sein, sodass hier eine maximale Wiederholgenauigkeit für die spätere Versuchsdurchführung gewährleistet ist. Bei Nutzung einer eigenen pneumatischen Aktuierung pro Schieber ist der Weg der Schieber zum Anschlag zunächst nicht bekannt und dadurch nicht definiert, was sich negativ auf die Synchronisation und damit auf die Wiederholgenauigkeit der Bewegung auswirken kann. Nur in der Kombination mit einer mechanischen Kopplung und Führung der Schieberbewegung kann die Pneumatik daher für diesen Anwendungsfall eingesetzt werden. Demgegenüber steht die elektromechanische Aktorik, bei der die Position der Schieber bis zum Anschlag ständig definiert und bekannt ist, sodass die einzelne elektromechanische Ansteuerung der Achsen grundsätzlich möglich ist. Die elektromechanische Kopplung der Bewegung ist jedoch aufwändig, da diese, beispielsweise bei Werkzeugmaschinen, über einen Interpolator und eine NC-Steuerung umgesetzt werden muss. Aus diesem Grund ist auch hier eine mechanische Kopplung der einzelnen Schieber zu bevorzugen. Eine manuelle Aktuierung der Schieber wird ausgeschlossen, da hierbei die Wiederholgenauigkeit nicht oder nur mit größerem konstruktivem Aufwand gewährleistet werden kann und eine aufwändigere Versuchsdurchführung resultiert. Zusammenfassend muss zwischen einer elektromechanischen und pneumatischen Aktorik mit mechanischer Kopplung der vier Schieber abgewogen werden. Auf Basis der geringeren Kosten sowie der einfacheren und schnelleren Systemintegration wird sich für die pneumatische Aktorik entschieden. (A_Kaiser 2022)

6.1.2.2 Bewegungskinematik und Greifer

Zur Realisierung der Handhabung der Elektrode zwischen dem Ausrichttisch und dem Stapeltisch muss eine geeignete Bewegungskinematik entwickelt werden. Ein Achsportaal mit festem Tisch bietet zunächst den Vorteil, dass weder der Ausrichttisch noch der Stapeltisch bewegt werden müssen und somit insbesondere für den Stapeltisch kein Risiko besteht, dass der Stapel bzw. einzelne Stapelkomponenten durch die Bewegung des Tisches verschoben werden. Nachteilig wirkt sich allerdings die Achskonstruktion aus. Die x-Achse muss auf die z-Achse aufgebaut werden. Zur Realisierung der notwendigen Präzisions- und Steifigkeitsanforderungen muss daher die z-Achse im Vergleich zur x-Achse deutlich massiver ausgeführt werden, was zu größeren Aktoren und damit zu höheren Kosten und zu einem größeren Flächenbedarf führt. Im Vergleich dazu können die Konzepte „Portal mit beweglichem Tisch“ sowie „Ständer mit beweglichem

Tisch“ in den einzelnen Achsen weniger massiv ausgeführt werden. Der Ständer mit beweglichem Tisch bietet im Vergleich zum Portal den Vorteil, dass sich die Zugänglichkeit mit dem Messsystem deutlich einfacher gestaltet. Das Portal mit beweglichem Tisch ist hingegen weniger störanfällig bei der Ablage des Elektrodenblattes auf den Stapel sowie dessen vorübergehender Fixierung bei dem Verfahren der Niederhalter. Insbesondere die Fixierung wirkt sich durch den Kragarm als Moment um die x-Achse aus, sodass sichergestellt werden muss, dass kein Einfluss auf den Stapel sowie die Genauigkeit der Bewegungskinematik ausgeübt wird. An dieser Stelle ist zunächst anzumerken, dass jede Kinematik so konstruiert werden kann, dass sie die Anforderungen an Präzision und Wiederholgenauigkeit erfüllen kann. Das Verfahren des Greifers mit gegriffener Elektrode wird hinsichtlich der Anfälligkeit auf Vibrationen durch die Bewegung jedoch kritischer eingeschätzt als das Verfahren des Stapeltisches bei fixiertem Stapel, sodass das Achsportal mit festem Tisch ausscheidet. Hinsichtlich des Portals mit beweglichem Tisch ist zwar die Positionierung des Messsystems schwieriger, allerdings ist anzunehmen, dass der Einfluss der Kinematik auf die Stapelbildung geringer ist. Aus diesem Grund wird sich final für das Portal mit beweglichem Tisch entschieden. (A_Kaiser 2022)

Im Hinblick auf die Aktorik der Bewegungskinematik ist anzumerken, dass bei jedem Prozessschritt lediglich die anzufahrende Endposition relevant ist. Die Strecke dazwischen ist grundsätzlich für die geplanten Versuche nicht relevant. Es muss lediglich sichergestellt werden, dass die Bewegungen keinen Einfluss auf den Prozess nehmen. Dies führt zu der Einschätzung, dass eine pneumatische Aktorik oder auch eine manuelle Bedienung hinsichtlich der zu erwartenden Kosten sowie des Integrationsaufwands vorteilhaft gegenüber der elektromechanischen Aktorik ist. Die Sicherstellung der richtigen Endpositionen kann jeweils über Anschläge oder Zentrierungen gelöst werden. Bei der Ablage der Elektrode auf den Stapel sowie dessen Fixierung ist allerdings eine gleichmäßige Kraft notwendig, weswegen sich bei der z-Achse für einen pneumatischen Aktor entschieden wird. Beim Verfahren des Tisches gibt es dahingehend allerdings keine spezifischen Anforderungen an Kräfte oder Geschwindigkeiten, da der Einfluss der Dynamik nicht im Fokus der Untersuchungen steht. Aus diesem Grund wird sich für eine manuelle Verschiebung des Tisches entschieden, da dadurch die benötigte Fläche sowie der Integrationsaufwand minimiert werden können. Als Endeffektor der Kinematik wird sich für einen Niederdruckflächengreifer entschieden, da diese Greiferart entsprechend Kapitel 2.2.4.1 als Stand der Technik gilt. (A_Kaiser 2022)

6.1.2.3 Stapeltisch mit Niederhalter

Als weiteres Modul müssen Lösungen für den Stapeltisch mit Niederhalter gefunden werden. Hierfür sind vier Niederhalter notwendig, die sich jeweils in zwei Achsrichtungen bewegen können müssen. Zum einen muss der Stapel vertikal fixiert werden und zum anderen müssen die Niederhalter nach außen wegfahren, um das nächste Elektroden- oder Separatorblatt fixieren zu können. Ähnlich wie bei dem Greifer muss über die Niederhalter eine konstante und gleichmäßige Kraft zur Fixierung des Stapels aufgebracht werden, weswegen eine manuelle Aktuierung ausscheidet. In der Abwägung einer elektromechanischen und pneumatischen Lösung wird sich für eine pneumatische Aktuierung entschieden. Der Grund hierfür ist zunächst der deutlich geringere konstruktive Aufwand. Auch eine durchgängig bekannte Position in der Bewegung der Niederhalter ist an dieser Stelle nicht notwendig. Aufgrund der zwei Achsen pro Niederhalter wäre weiterhin eine mechanische Kopplung der vier Niederhalter konstruktiv sehr aufwändig. Im Gegensatz zu den Schiebern ist die Kopplung der Niederhalter allerdings weniger relevant, da diese sich lediglich dann bewegen, wenn der Greifer parallel den Stapel fixiert. In Abwägung mit dem konstruktiven Aufwand einer mechanischen Kopplung wird sich daher für eine eigene pneumatische Aktuierung pro Niederhalter ohne mechanische Kopplung entschieden. Eine mögliche leichte Abweichung bei der Synchronisierung der Niederhalterbewegung kann in Kauf genommen werden. (A_Fuchs 2023; A_Kaiser 2022)

6.1.2.4 Gesamtanlagensteuerung und Gestell

Abschließend benötigt die Anlage eine Gesamtanlagensteuerung und ein Gestell. Bei der Auswahl der Teillösungen für die Aktorik wurde sich durchgängig für eine Pneumatik entschieden, elektromechanische Achsen sind für den vorliegenden Anwendungsfall nicht notwendig. Daraus kann zunächst geschlossen werden, dass eine NC-Steuerung nicht notwendig ist. Bei der Abwägung zwischen einer SPS-Steuerung und einem Raspberry Pi wird sich für den Raspberry Pi entschieden, der als kleiner Computer kleinere Automatisierungsaufgaben übernehmen kann (Raspberry Pi Ltd 2023)¹³. Für die vorliegende Laboranwendung kann zu Gunsten der Kosten auf die Robustheit und Performance, die eine klassische SPS mitbringen würde, verzichtet werden. Hinsichtlich

¹³ Raspberry Pi Ltd (2023), *Raspberry Pi*. <https://www.raspberrypi.com/> [24.11.2023].

des Gestells wird sich zunächst aus Kostengründen gegen ein Gussgestell entschieden, da es sich um eine Sonderkonstruktion mit der Stückzahl eins handelt. Da für eine Schweißkonstruktion mit der entsprechenden Präzision große Schweißvorrichtungen notwendig wären, wird ein Gestell aus Aluminiumprofilen ausgewählt. Als Tischplatte soll eine durchgängige Aluminiumplatte verwendet werden, sodass die Präzision für die Aufbauten gewährleistet ist. (A_Freyd 2022; A_Kaiser 2022)

6.1.3 Gesamtkonzept und Realisierung

Auf Basis der ausgewählten Teillösungen werden die einzelnen Module ausdetailliert, konstruiert sowie gefertigt und in den Versuchsstand integriert. Das Gestell wird aus 90 mm x 90 mm und 90 mm x 180 mm Aluminiumprofilen konstruiert, worauf eine 60 mm dicke Aluminiumplatte geschraubt wird. Zur Realisierung der Bewegung wird diese als Grundplatte für ein Säulenführungsgestell mit Wälzführungen verwendet, das im Rahmen der Abschlussarbeit (A_Kaiser 2022) entwickelt wurde und als Modul inklusive der Grundplatte von der Firma Paul Hafner GmbH hergestellt wurde. Zur Bewegung der z-Achse wird ein Hubzylinder vom Typ DSBC-32-125-PPSA-N3 der Firma Festo SE & Co. KG verwendet. Als Greifer, der an dem Zylinder befestigt wird, wird eine Sonderkonstruktion des Vakuum-Flächensauggreifer FLGR S der Firma J. Schmalz GmbH eingesetzt, dessen Greiffläche auf die verwendeten Abmaße der Elektrode ausgelegt wird und aus dem Material Polyetheretherketon (PEEK) besteht, s. Abbildung 6-4. Damit keine Kollision mit den Niederhaltern auftreten kann, wird die Fläche an den Ecken ausgespart, wie es beispielsweise auch bei (Weinmann 2022, S. 76–77) beschrieben wird, und auch seitens des Herstellers hinsichtlich der Industrierelevanz bestätigt werden konnte. Auf die Grundplatte werden zwei Führungsschienen montiert, auf denen über vier Linearführungswagen eine weitere, 25 mm dicke Aluminiumplatte bewegt werden kann. Für die Führungsschienen wird das Modell AR/HR 25 sowie für die Linearwagen das Modell ARC 25 FN der Firma Dold Mechatronik GmbH beschafft. Auf dieser Platte werden der Ausrichttisch mit Schieber sowie der Stapeltisch mit Niederhalter fest verschraubt. Durch die Linearführungen kann damit entweder der Stapel oder der Ausrichttisch unter der z-Achse bzw. dem Greifer positioniert werden. Zur Sicherstellung einer hohen Wiederholgenauigkeit sind in der Grundplatte zwei kegelförmige Zentrierstifte eingefügt, die über einen pneumatischen Hubzylinder des Typs ADN-32-15-I-P-A der Firma Festo SE & Co. KG die Aluminiumplatte mit den beiden

Tischen in den zwei notwendigen Positionen zentriert. Die Bewegungskinematik sowie der Greifer und dessen Abmaße sind in Abbildung 6-4 zu sehen.

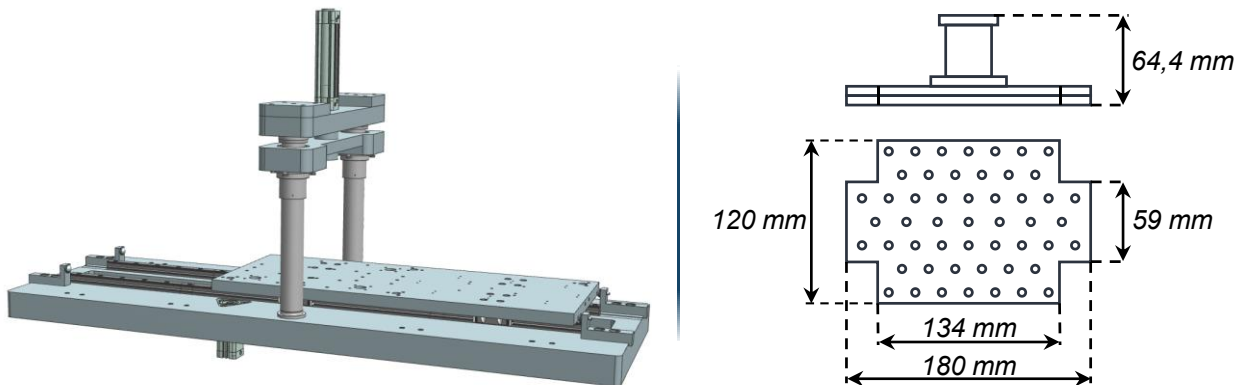


Abbildung 6-4: Säulenführungsgestell mit Wälzführungen (links) und Greifer (rechts) in Anlehnung an (A_Kaiser 2022)

Für den Ausrichttisch und die Schieberbewegung wird ein Mechanismus umgesetzt, wie er ähnlich auch in einer industrienahen Z-Faltmaschine der Firma Gelon zu finden ist, die am BATEC vorhanden ist. Über das vertikale Anheben eines Kegels und vier Wälzlager, deren Außenringe sich auf der Oberfläche des Kegels bewegen und deren Innenringe mit den Schiebern fest verbunden sind, werden die Schieber nach außen gedrückt. Für das Anheben des Kegels wird ein Kompaktzylinder des Typs ADN-S-40-15-I-P-A der Firma Festo SE & Co. KG verbaut. Rückstellfedern des Typs R203-106 der Firma Sodemann Industrifedre A/S sorgen beim Absenken des Kegels für ein gleichmäßiges Schließen der Schieber und der damit einhergehenden Positionierung des Elektrodenblatts. Der in (A_Fuchs 2023) umgesetzte Mechanismus ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

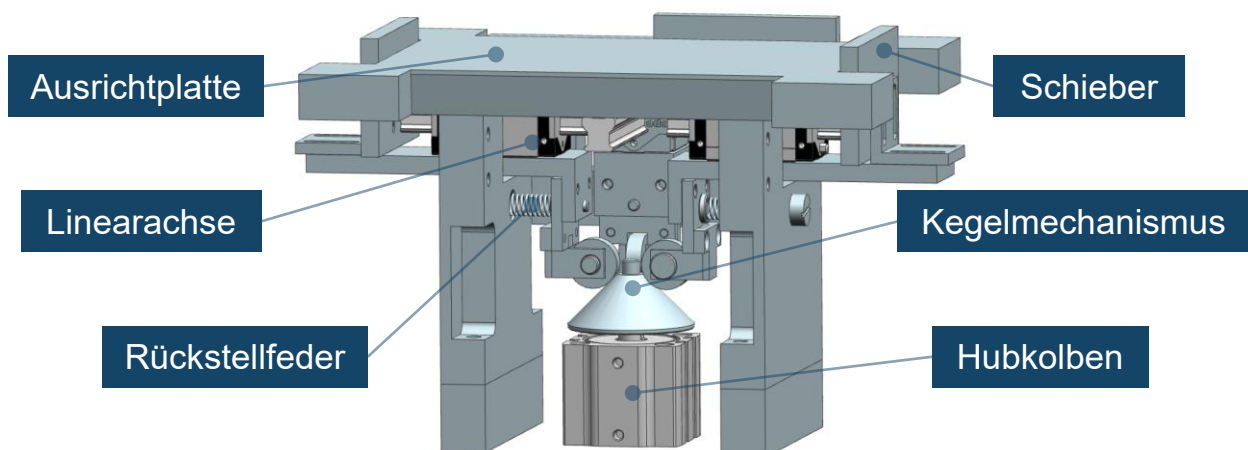


Abbildung 6-5: Ausrichttisch und Schieber mit Aktorik zur gleichmäßigen Bewegung der Schieber in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Für den Stapeltisch wird eine ebene Aluminiumplatte konstruiert, auf der die Stapelkomponenten abgelegt werden. Unter der Platte sind vier Niederhalter notwendig, die den Stapel fixieren und iterativ ein weiteres Separator- oder Elektrodenblatt fixieren können. Für jeden Niederhalter wird ein Modul konstruiert, das die horizontale und vertikale Bewegung realisiert. Hierzu wird über vier runde Gleitführungen und einem Kurzhubzylinder des Typs ADVC-20-25-I-P der Firma Festo SE & Co. KG die vertikale Bewegung umgesetzt. Die Bewegung wird so ausgelegt, dass der Niederhalter einen vertikalen Hub von 25 mm durchführen kann. Die horizontale Bewegung wird über einen Kompaktzylinder des Typs DPDM-16-50-PA realisiert und auf eine Länge von 50 mm ausgelegt. Die horizontale Bewegung wird über eine Linearführung des Typs AR/HR 15 sowie einem dazu passenden Linearwagen des Typs ARC 15 FN geführt. Die Niederhalter selbst sind mit einer rechteckigen Kontaktfläche zu den Stapelkomponenten konstruiert, wobei die Kanten der Niederhalter stark verrundet wurden, um keinen Schaden an den Elektroden bzw. dem Separator zu verursachen. Das Niederhaltermodul ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Unter dem Stapeltisch werden vier der Module positioniert, sodass der Zellstapel an vier Positionen fixiert werden kann.

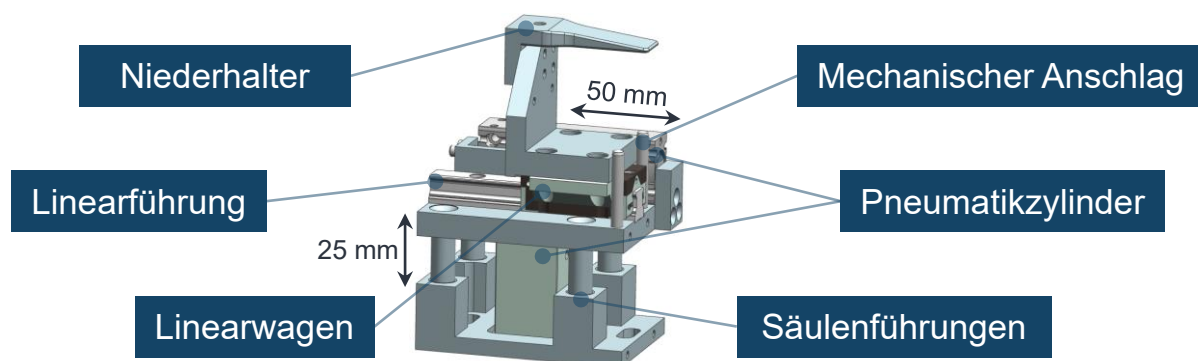


Abbildung 6-6: Aufbau des Niederhaltermoduls in Anlehnung an (A_Kaiser 2022)

Entsprechend Kapitel 6.1.2.4 werden die pneumatischen Aktoren mittels eines Raspberry Pi sowie 5/2-Wegeventilen der Firma Festo SE & Co. KG gesteuert.

Auf Basis der einzelnen entwickelten Module wird der Versuchsstand aufgebaut und ist in Abbildung 6-7 dargestellt.

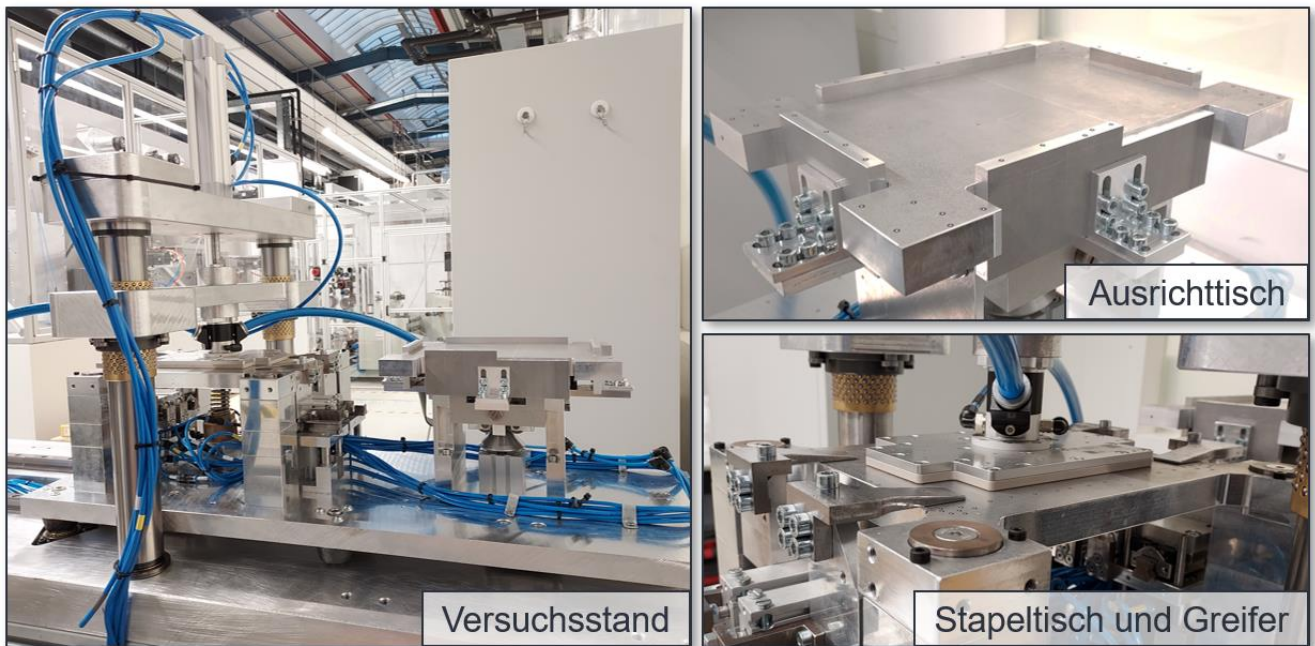


Abbildung 6-7: Versuchsstand zur Untersuchung der Einzelblattstapelbildung

Im Abgleich mit den in Tabelle 6-1 getroffenen Anforderungen an den Versuchsstand kann konstatiert werden, dass alle Fest-, Bereichs sowie auch Wunschforderungen erfüllt werden. Hinsichtlich des Gebrauchs kann der grundsätzliche Ablauf der Stapelbildung wie folgt durchgeführt werden:

1. Manuelle Positionierung des Ausrichttisches unter dem Portal und dem Greifer;
2. Manuelle Ablage der Kathode auf dem Ausrichttisch und Zufahren der Schieber mit gleichzeitiger Positionierung der Kathode;
3. Absenken des Greifers, Ansaugen der Kathode, Öffnen der Schieber und Anheben des Greifers inklusive gegriffener Kathode;
4. Manuelle Positionierung des Stapeltisches unter dem Portal und dem Greifer mit Kathode;
5. Absenken des Greifers auf den Stapeltisch sowie auf die Niederhalter;
6. Verfahren der Niederhalter mit anschließendem Absenken der Niederhalter auf den Stapel inklusive der hinzugefügten Kathode;
7. Lösen und Anheben des Greifers und manuelle Positionierung des Ausrichttisches unter dem Portal und dem Greifer.

Es ist anzumerken, dass durch die Größenunterschiede von Kathode und Anode sowie durch die Steifigkeit des Separators der Ausrichtvorgang im vorgestellten Versuchsstand nur für die Kathode geeignet ist. Da lediglich das Verhalten des Kathodenblatts in der vorliegenden Arbeit untersucht wird, ist es aber zulässig, den Separator sowie

die Anode visuell auf dem Ausrichttisch zu platzieren und ohne Nutzung der Positionierungsfunktion mit den Schiebern zu greifen, da die Abmaße des Separatorblatts als auch des Anodenblatts deutlich größer als die des Kathodenblatts sind.

6.2 Versuchsplanung

Zur Untersuchung der Einzelblattstapelbildung wird eine statistische Versuchsplanung durchgeführt. Hierfür werden zunächst die zu untersuchenden Zielgrößen in Kapitel 6.2.1 beschrieben, worauf die Einflussfaktoren sowie deren Faktorstufen in Kapitel 6.2.2 folgen. Abschließend werden die entworfenen Versuchspläne in Kapitel 6.2.3 vorgestellt. Die Versuchsplanung wurde im Rahmen der angeleiteten Abschlussarbeit (A_Fuchs 2023) erarbeitet und für die vorliegende Arbeit nochmal erweitert.

6.2.1 Zielgrößen der einzelnen Prozessschritte

Entsprechend dem in Kapitel 4.1.2 definierten Referenzprozess lässt sich die Einzelblattstapelbildung in die drei Prozessschritte Elektrodenausricht- und Greifprozess, Handhabungsprozess und Ablageprozess mit Niederhalter-Greifer-Interaktion unterteilen, die sequenziell nacheinander ablaufen. Im Hinblick auf ein Prozessverständnis der gesamten Einzelblattstapelbildung werden die Auswirkungen der Prozessschritte jeweils einzeln untersucht. Der Ablageprozess mit Niederhalter-Greifer-Interaktion wird dabei in zwei Untersuchungsschritte unterteilt, die eigentliche Ablage sowie die Niederhalter-Greifer-Interaktion. Daraus lassen sich die in Abbildung 6-8 beschriebenen Zielgrößen ableiten.

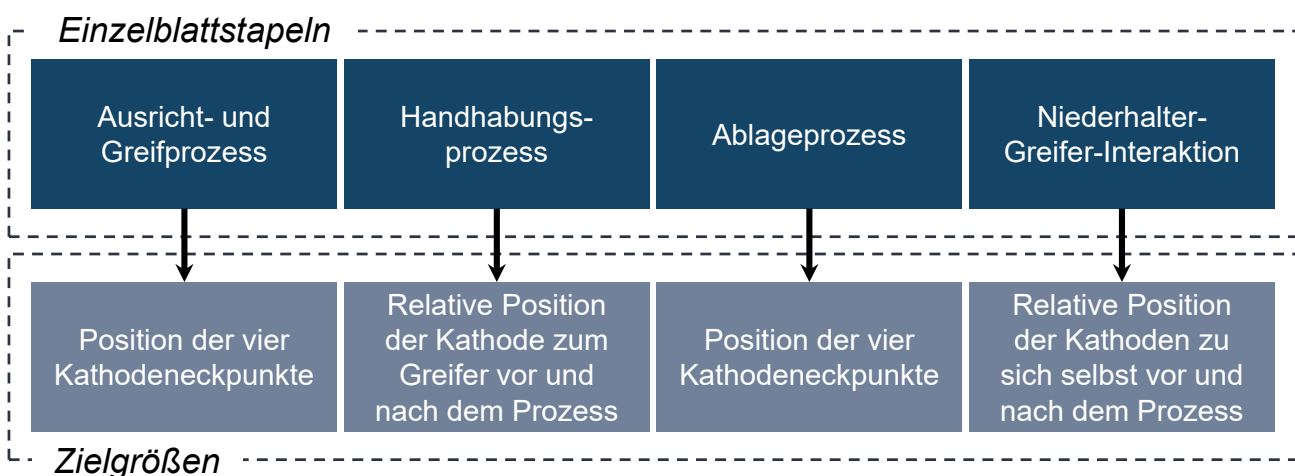


Abbildung 6-8: Auf die einzelnen Prozessschritte aufgeteilte Zielgrößen

Für den **Ausricht- und Greifprozess** ist entscheidend, wie sich die Kathode in Abhängigkeit des Ausrichtens sowie des Greifens insbesondere im Hinblick auf die in Kapitel 5 beschriebenen geometrischen Formabweichungen auf dem Ausrichttisch positioniert. Aus diesem Grund werden hierfür die vier Eckpunktkoordinaten $P_{AG,1..4}(X_{AG,1..4}, Y_{AG,1..4})$ der ausgerichteten und gegriffenen Kathode als Zielgröße definiert. Der Ursprung des Referenzkoordinatensystems ist dabei auf den Ausrichttisch gelegt. Die Kathodenblätter weisen eine Rundung an der Ecke auf, was bei der Identifikation des richtigen Eckpunktes problematisch ist. Um dieses Problem zu umgehen, werden die Eckpunkte $P_{AG,1..4}$ als Schnittpunkte der Kanten des Aktivmaterials definiert, s. Abbildung 6-9.

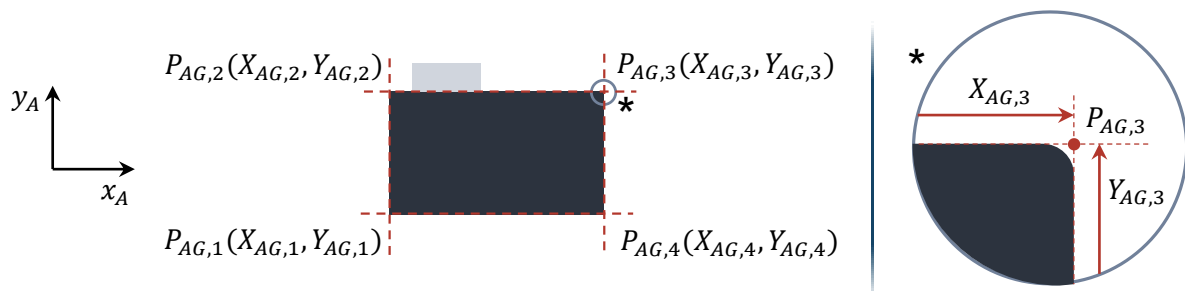


Abbildung 6-9: Schematische Darstellung der Kathodeneckpunkte am Beispiel des Ausricht- und Greifprozesses mit $P_{AG,1..4}(X_{AG,1..4}, Y_{AG,1..4})$

Im gegriffenen Zustand ist innerhalb des **Handhabungsprozesses** zu untersuchen, ob eine relative Positionsverschiebung zwischen Greifer und Kathode auftritt, was sich auf die Ablagegenauigkeit auf den Stapel auswirkt. Hierfür werden Referenzpunkte auf die Kathode geklebt, deren Positionskoordinaten $P_H(X_H, Y_H)$ vor und nach dem Handhabungsprozess gemessen werden und daraus als Zielgröße die euklidische Distanz $d_H(P_H, P'_H)$ berechnet wird. Für den **Ablageprozess** ist der Einfluss der Niederhalter beim Fixieren der Kathode auf dem Stapeltisch zu prüfen, insbesondere ob und ggf. wie sich eine Streckung möglicher Welligkeiten in der Elektrode auf die Position auswirkt. Entsprechend der Zielgröße beim Ausricht- und Greifprozess werden auch hier die vier Eckpunktkoordinaten $P_{Ab,1..4}(X_{Ab,1..4}, Y_{Ab,1..4})$ der Kathode als Zielgröße definiert. Der Ursprung des Referenzkoordinatensystems wird dabei mittels fixen Referenzpunkten auf dem Stapeltisch definiert. Zuletzt muss die **Niederhalter-Greifer-Interaktion** untersucht werden, die zwangsläufig sukzessive bei der Stapelbildung auftritt. Es ist zu prüfen, ob eine Relativbewegung der Kathode zwischen der initialen Ablage auf den Stapel sowie nach Abschluss der Stapelbildung aufgetreten ist. Entsprechend dem Handhabungsprozess werden hierfür Referenzpunkte auf die Kathodenblätter geklebt,

womit deren initiale Positionskordinaten $P_{NGI}(X_{NGI}, Y_{NGI})$ mit deren abschließenden Positionskordinaten $P'_{NGI}(X'_{NGI}, Y'_{NGI})$ verglichen werden können. Auch hierfür wird die euklidische Distanz $d_{NGI}(P_{NGI}, P'_{NGI})$ als Zielgröße berechnet. Tabelle 6-2 gibt zu den erläuterten Zielgrößen einen zusammenfassenden Überblick.

Tabelle 6-2 Zielgrößen mit Prozessschritt und Einheiten

Prozessschritt	Zielgröße	Einheit
Ausricht- und Greifprozess	$P_{AG,1..4}(X_{AG,1..4}, Y_{AG,1..4})$	(mm, mm)
Handhabungsprozess	$d_H(P_H, P'_H)$	mm
Ablageprozess	$P_{Ab,1..4}(X_{Ab,1..4}, Y_{Ab,1..4})$	(mm, mm)
Niederhalter-Greifer-Interaktion	$d_{NGI}(P_{NGI}, P'_{NGI})$	mm

Alle Zielgrößen aus Tabelle 6-2 werden mithilfe des Messsystems GOM Atos Core 135 ermittelt.

6.2.2 Untersuchte Einflussfaktoren und Faktorstufen

Im Zentrum der Untersuchungen stehen die Auswirkungen der Geometrieabweichungen der vereinzelt Kathodenblätter auf die Stapelgenauigkeit. Aus diesem Grund wird die Einzelblattstapelbildung hinsichtlich des Einflusses veränderter Strukturparameter untersucht. Prozessparameter und Maschinenkenngrößen werden konstant gehalten. Die Basis für die Auswahl der Strukturparameter bilden die in Kapitel 4.2 durchgeführte Analyse der Einflussparameter sowie die identifizierten Strukturparameter. Im Folgenden werden die zu untersuchenden Faktoren vorgestellt und im Hinblick auf die Ergebnisse aus Kapitel 5 spezifiziert. Aufgrund der Vielzahl an Faktoren werden die Versuchsumfänge jedoch schnell groß, insbesondere wenn viele Faktorstufen gewählt werden. Für diesen Fall werden häufig Versuchspläne verwendet, die für jeden Faktor zwei Stufen aufweisen (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 28–35). Vor allem in den frühen Phasen sind nach (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 6) unter der Voraussetzung eines funktionstüchtigen Systems größere Stufen ratsam, um in den ersten Untersuchungen einen möglichst großen Bereich abzudecken und die Relevanz des Faktors abschätzen zu können. Aus diesem Grund werden für jeden Einflussfaktor zwei Faktorstufen ausgewählt.

Hinsichtlich der zu untersuchenden Parameter werden das **Aktivmaterial** sowie die **Massenbeladung** entsprechend der in Kapitel 5 verwendeten Kathoden, also NMC622 und NMC811 sowie $m_B = 41,6 \text{ mg cm}^{-2}$ und $m_B = 55,0 \text{ mg cm}^{-2}$ (jeweils doppelseitig) als Einflussfaktoren gewählt. Der Einfluss der beiden Faktoren auf die geometrische

Ausprägung des Einzelblattes war zwar unauffällig, allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie insbesondere bei den auftretenden Biegebelastungen im Prozess weiterhin keinen Einfluss haben. Hinsichtlich der Ebenheitsabweichungen der vereinzelt Kathodenblätter zeigt sich in Kapitel 5 der **Verdichtungsgrad** der Kathode als möglicher Einflussfaktor auf die Stapelgenauigkeit. Bei Vorversuchen zeigte sich jedoch, dass Kathodenblätter mit einem Verdichtungsgrad von $\Pi_B = 30\%$ bzw. $\Pi_B = 35\%$ kaum beschädigungsfrei verarbeitet werden können. In einer realen Produktion wären diese daher aufgrund von Materialabplatzungen und Rissen als Ausschuss zu betrachten. Aus diesem Grund werden die beiden Faktorstufen auf $\Pi_B = 15\%$ und $\Pi_B = 25\%$ festgesetzt. Darüber hinaus zeigte sich in Kapitel 5, dass auch die **Ablageseite** des Kathodenblattes auf die geometrische Form einen deutlichen Einfluss zeigt. Für die Untersuchungen werden daher die beiden Seiten A und B als Faktorstufen festgelegt.

Weiterhin ist zu erwarten, dass die **geometrischen Abmaße der Kathodenblätter** einen Einfluss auf die Stapelgenauigkeit haben. Insbesondere bei dem Ausrichten der Kathoden ist zu erwarten, dass diese wesentlich die Ablageposition der Kathodenblätter auf den Stapel beeinflussen und somit einen starken Einfluss auf die resultierende Stapelgenauigkeit haben. Ausgehend vom Nennmaß des Kathodenblatts, was einer Breite von $b_K = 135\text{ mm}$ und einer Länge von $l_K = 208\text{ mm}$ entspricht, werden als Faktorstufen ein Kathodenblatt mit Übermaß und eines mit Untermaß definiert. Diese werden mit den Breiten $b_{K,\text{Über}} = 136\text{ mm}$ bzw. $b_{K,\text{Unter}} = 134,5\text{ mm}$ sowie den Längen $l_{K,\text{Über}} = 209\text{ mm}$ bzw. $l_{K,\text{Unter}} = 207,5\text{ mm}$ definiert. Die Maße ergeben sich aus der Betrachtung der zu erzielenden Stapelgenauigkeit. Bei einer größtmöglichen Stapelgenauigkeit von $\pm 0,5\text{ mm}$ sowie der Annahme, dass das Kathodenblatt mit einem Überlapp zu zwei Seiten des Ausrichttischs initial positioniert wird, ist zu erwarten, dass es nach dem Ausrichten nach rechts sowie nach oben verschoben wird. Ist das Blatt 1 mm zum jeweiligen Breiten- bzw. Längenmaß kürzer, läge es damit außerhalb der Toleranz. Aus diesem Grund werden die Längen- und Breitenmaße für das Untermaß für die initiale Untersuchung nur um $0,5\text{ mm}$ reduziert. Beim Übermaß hingegen ist zu erwarten, dass sich das Kathodenblatt zentriert und der Überlapp zu gleichen Teilen nach links und rechts bzw. nach oben und unten aufteilen wird, sodass das Kathodenblatt mit einem Übermaß von 1 mm in die Breite und Länge gerade noch im Toleranzbereich von $\pm 0,5\text{ mm}$ liegt. Abbildung 6-10 visualisiert die getroffenen Annahmen für

das Untermaß sowie die definierten Abmaße der Elektrode. Zur Beschränkung des experimentellen Aufwands beinhalten die gewählten Maße die Annahme, dass die Kathodenblätter mit einem rechteckigen Bandstahlschnittwerkzeug mit geraden Kanten vereinzelt werden. Bei Bedarf können weitere toleranzbedingte Maßabweichungen, beispielsweise ausbauchende Kanten, simulativ untersucht werden.

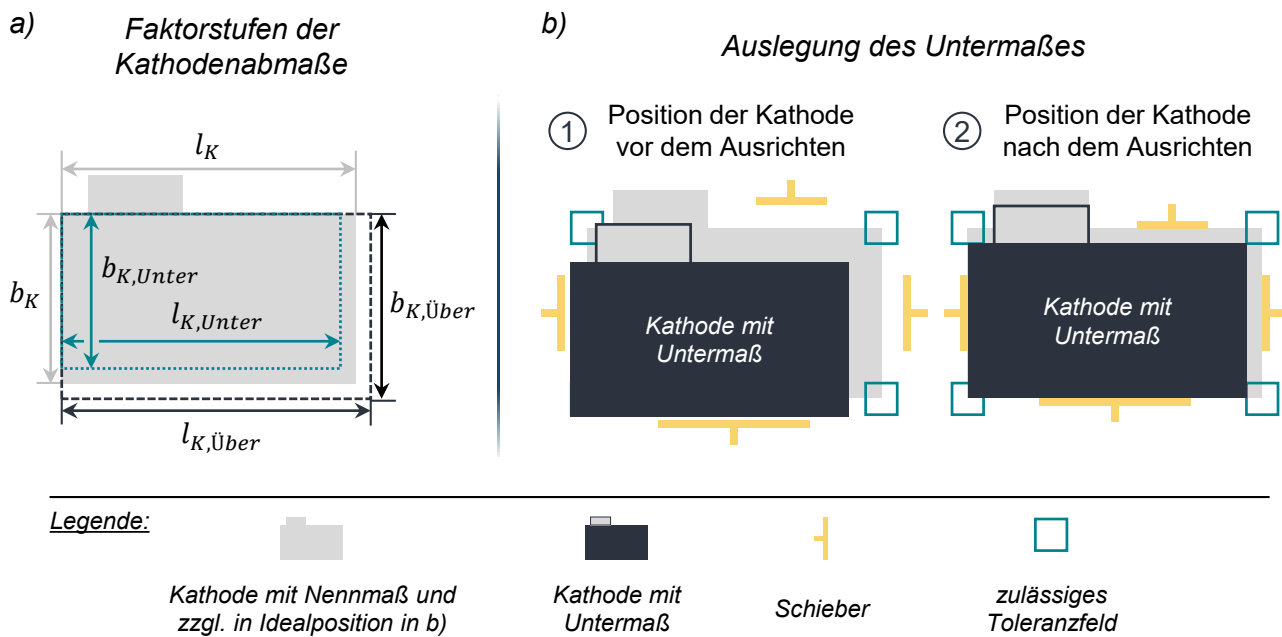


Abbildung 6-10: Faktorstufen der Kathodenabmaße in a) und Auslegung des Untermaßes in b) in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Zusammengefasst ergeben sich die zu untersuchenden Einflussfaktoren sowie deren Faktorstufen wie in Tabelle 6-3 dargestellt. Als Konvention werden die Faktorstufen +1 bzw. -1 zugeordnet, was die spätere Versuchsplanung übersichtlicher macht.

Tabelle 6-3: Zu untersuchende Einflussfaktoren und Faktorstufen in der Einzelblattstapelbildung in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Einflussfaktoren	Faktorstufe -1	Faktorstufe +1
Geometrische Abmaße l_K & b_K	$b_{K,Unter} = 134,5 \text{ mm}$ $l_{K,Unter} = 207,5 \text{ mm}$	$b_{K,Über} = 136 \text{ mm}$ $l_{K,Über} = 209 \text{ mm}$
Verdichtungsgrad Π_B	$\Pi_B = 15 \%$	$\Pi_B = 25 \%$
Ablageseite	Seite A	Seite B
Aktivmaterial	NMC622	NMC811
Massenbeladung m_B	$m_B = 41,6 \text{ mg cm}^{-2}$	$m_B = 55,0 \text{ mg cm}^{-2}$

Darüber hinaus wird bei der Materialvorbereitung darauf geachtet, dass die Kathoden möglichst schnell verarbeitet werden, um hinsichtlich des Zeiteinflusses möglichst nahe an einem industriellen Szenario zu sein.

6.2.3 Aufstellen der Versuchspläne

Die Untersuchung der fünf Einflussfaktoren mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans würde 2^5 , also 32 Versuchsdurchläufe erfordern. Zur Erhöhung der Robustheit und statistischen Absicherung wird mit drei Replikationen geplant, was den Gesamtumfang der Versuchsdurchläufe auf 96 erhöhen würde und in dem Umfang aufgrund der Versuchsdauer praktisch nicht umsetzbar ist. Aus diesem Grund wird ein Screening-Versuchsplan, auch teilfaktorieller Versuchsplan genannt, entworfen. Ziel hierbei ist es, mit vertretbarem Versuchsaufwand viele Faktoren untersuchen zu können (Siebertz & van Bebber et al. 2017, S. 28). Da die Untersuchung der Ausricht- und Greif-, Handhabungs- und Ablageprozesse zeitlich weniger aufwändig sind, können hierfür umfangreichere teilfaktorielle Versuchspläne verarbeitet werden als für die Untersuchung der Niederhalter-Greifer-Interaktion. Aus diesem Grund werden hierfür zwei unterschiedliche Versuchspläne entworfen, die im Folgenden vorgestellt werden.

6.2.3.1 Versuchsplan für die Ausricht- und Greif-, Handhabungs- und Ablageprozesse

Für den Versuchsplan der Ausricht- und Greif-, Handhabungs- und Ablageprozesse wird ein Definitive Screening Design (DSD) verwendet, welches 2011 erstmals von (Jones & Nachtsheim 2011) eingeführt wurde. Ursprünglich war das DSD nur für quantitative Faktoren mit drei Stufen anwendbar, was 2013 allerdings durch (Jones & Nachtsheim 2013) auf kategoriale, zweistufige Faktoren erweitert wurde und somit für den vorliegenden Fall anwendbar ist. Im Vergleich zu den häufig verwendeten teilfaktoriellen Versuchsplänen 2^{k-p} nach (Box & Hunter 1961) mit k Faktoren und dem Bruchteil p der lediglich durchzuführenden Versuche können die Haupteffekte unabhängig der zwei-Faktor-Wechselwirkung bestimmt werden (Jones & Nachtsheim 2011), weswegen sich für diesen Versuchsplan entschieden wurde. In Tabelle 6-4 findet sich der mithilfe der Minitab Statistical Software der Firma Minitab Inc. entworfene Versuchsplan. Für die fünf Faktoren sind 14 Basisdurchläufe erforderlich, was sich bei drei Replikationen auf 42 Versuchsdurchläufe in Summe erhöht. Die Versuche werden randomisiert durchgeführt. Die Zuordnung von ± 1 zu den Faktorstufen kann Tabelle 6-3 entnommen werden.

Tabelle 6-4: Definitive Screening Versuchsplan für die Ausricht- und Greif- und Ablageprozesse in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Versuchsnummer	Aktivmaterial	Massenbelastung	Verdichtungsgrad	Geometrische Abmaße	Ablageseite
1	-1	+1	-1	+1	+1
2	-1	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	+1	-1	+1
4	-1	-1	-1	+1	-1
5	-1	-1	-1	-1	+1
6	-1	-1	+1	+1	+1
7	-1	-1	+1	-1	-1
8	+1	+1	-1	+1	+1
9	+1	+1	-1	-1	-1
10	+1	+1	+1	+1	-1
11	+1	+1	+1	-1	+1
12	+1	-1	-1	+1	-1
13	+1	-1	+1	+1	+1
14	+1	-1	+1	-1	-1

6.2.3.2 Versuchsplan für die Niederhalter-Greifer-Interaktion

Da die Versuche für die Niederhalter-Greifer-Interaktion deutlich aufwändiger sind, wird sich hier für einen teilfaktoriellen Versuchsplan 2^{k-p} nach (Box & Hunter 1961) mit $\frac{1}{4}$ -Fraktion, also mit $k = 5$ Faktoren und dem Bruchteil $p = 2$ der lediglich durchzuführenden Versuche, entschieden. Es resultieren somit acht Versuchsdurchläufe, die mit jeweils drei Replikationen durchgeführt werden. Die genaue Auflistung findet sich in Tabelle 6-5.

Tabelle 6-5: Teilfaktorieller Versuchsplan 2^{5-2} für die Niederhalter-Greifer-Interaktion

Versuchsnummer	Aktivmaterial	Massenbelastung	Verdichtungsgrad	Geometrische Abmaße	Ablageseite
1	-1	+1	-1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	+1
3	-1	-1	-1	+1	+1
4	+1	-1	-1	-1	-1
5	-1	+1	+1	-1	-1
6	+1	+1	+1	+1	+1
7	-1	-1	+1	-1	+1
8	+1	-1	+1	+1	-1

6.3 Einfluss des Ausricht- und Greifprozesses

Basierend auf dem Referenzprozess in Kapitel 4.1.2 sowie dem aufgebauten Versuchstand wird der Einfluss des Ausricht- und Greifprozesses im Hinblick auf die Positionierung der Kathode untersucht. Ziel ist es, die Auswirkungen der definierten Einflussfaktoren auf die Positionierung der Kathodeneckpunkte $P_{AG,1..4}(X_{AG,1..4}, Y_{AG,1..4})$ zu verstehen. Hierzu wird in Kapitel 6.3.1 die konkrete Versuchsdurchführung sowie dessen Auswertung beschrieben. In Kapitel 6.3.2 folgt die Vorstellung, Diskussion und Bewertung der Ergebnisse, die an den notwendigen Stellen mit detaillierteren Untersuchungen ergänzt werden. Die in diesem Kapitel vorgestellten Versuche wurden im Rahmen der vom Autor der vorliegenden Dissertation angeleiteten Abschlussarbeit (A_Fuchs 2023) durchgeführt.

6.3.1 Experimentelle Versuchsdurchführung und Auswertung

Für die Versuchsdurchführung wird der entwickelte Prüfstand benutzt und der Ausricht- und Greifprozess entsprechend dem Definitive Screening Versuchsplan durchgeführt. Der Versuchsablauf erfolgt entsprechend Abbildung 6-11. Die Maschinen- und Prozessparameter werden konstant gehalten. Lediglich der Schieber, der an der Ableiterseite des Kathodenblatts ansetzt, muss je nach Ablage-seite der Kathode gedreht werden. Für die Versuchsdurchführung werden zwei Gruppen gebildet, sodass der Umbau des Schiebers nur einmal erfolgen muss und so der Einfluss des Umbaus minimiert wird. Innerhalb der zwei Gruppen werden die Versuche randomisiert durchgeführt.

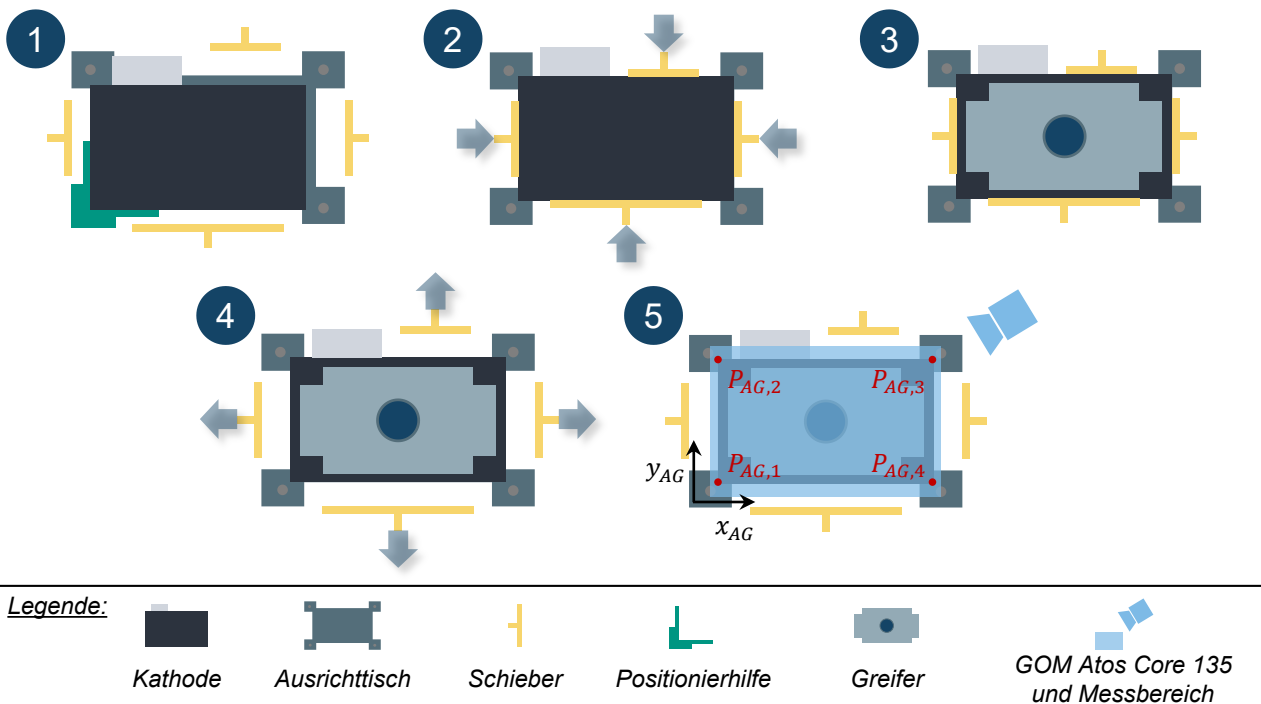


Abbildung 6-11: Versuchsablauf zur Untersuchung des Ausricht- und Greifprozesses in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Im Detail werden die einzelnen Schritte wie folgt durchgeführt:

1. Manuelle Platzierung der Kathode auf dem Ausrichttisch mittels mechanischer Positionierhilfe. Die Kathode hat hierbei einen leichten Überlapp zur linken und unteren Seite des Ausrichttisches;
2. Schließen der Schieber bis zum Ausrichttisch als mechanischen Anschlag und gleichzeitige Positionierung der Kathode;
3. Absenken des Greifers auf die Kathode mit anschließender Aktivierung der Ansaugung des Greifers;
4. Aktivierung der Schieber und Lösen des Schieberkontakts mit der Kathode;
5. Scan der 3D-Geometrie der Kathode mittels GOM ATOS Core 135.

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung werden die Scans der 3D-Geometrie mit der GOM Inspect Software 2022 ausgewertet. Hierfür wird ein Koordinatensystem definiert, das mittels Referenzpunkten, die auf den Ausrichttisch geklebt werden, in jeder Messung wiederholgenau definiert und ausgerichtet wird. Anschließend werden zum Ausrichttisch orthogonale Lotebenen in die vier Kanten des Aktivmaterials gelegt. In die Schnittgeraden der vier Ebenen werden dann Kantenpunkte konstruiert, anhand derer die X_{AG} - und Y_{AG} -Koordinaten der Kathodeneckpunkte $P_{AG,1..4}(X_{AG,1..4}, Y_{AG,1..4})$ ermittelt werden. Die Benennung der Eckpunkte erfolgt immer entsprechend der Darstellung

in Abbildung 6-11 und der definierten Lage des Koordinatensystems, sodass auch unabhängig der Ablage-seite der Kathode die Eckpunktkoordinaten im gleichen Bereich bleiben.

6.3.2 Bewertung des Ausricht- und Greifprozesses

In Abbildung 6-12 werden die Ergebnisse des Ausricht- und Greifprozesses gezeigt. Das linke Diagramm stellt hierbei alle gemessenen Eckpunkte der Kathoden des Versuchsplans dar. Das Ableiterföhnchen ist immer zwischen $P_{AG,2}$ und $P_{AG,3}$, allerdings je nach Ablage-seite der Kathode auf der linken oder rechten Seite. Vor allem bei $P_{AG,2}$ und $P_{AG,3}$ zeigen sich bereits visuell zwei ausgeprägte Cluster. Bei der weiteren Analyse wird schnell ersichtlich, dass diese Cluster das Unter- bzw. das Übermaß bilden, s. Abbildung 6-12 rechts.

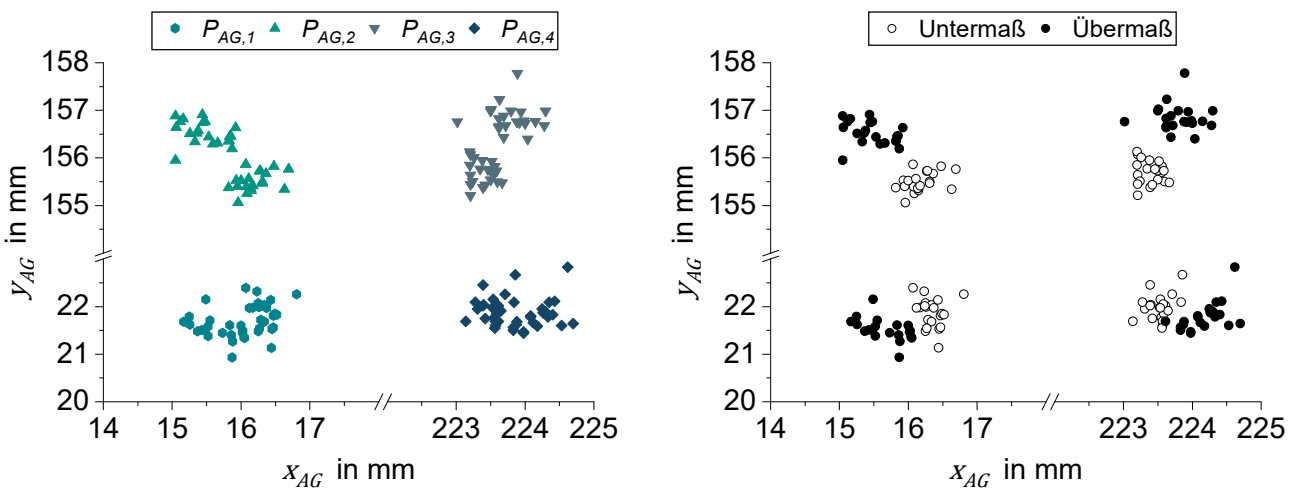
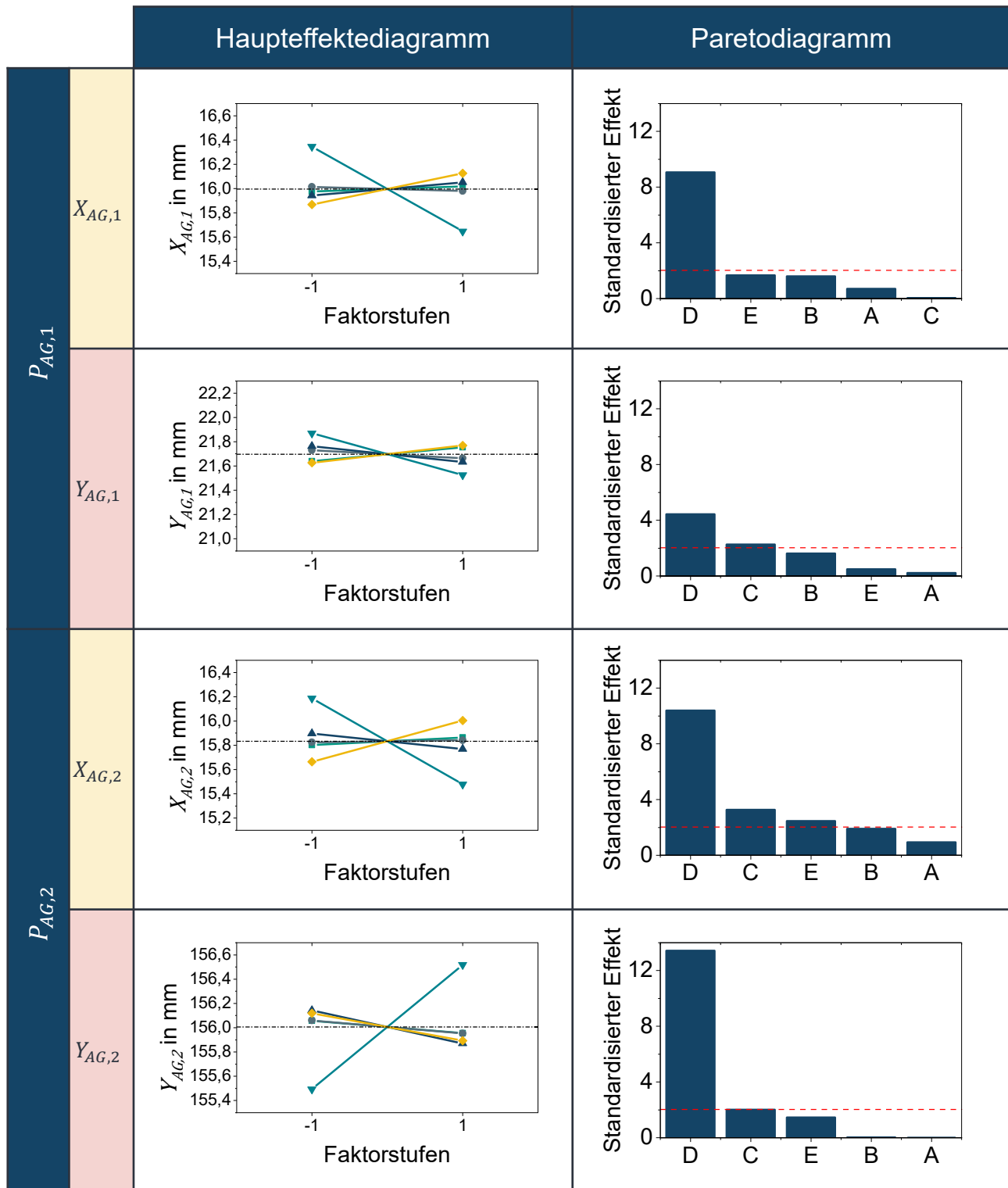


Abbildung 6-12: Gemessene Kathodeneckpunkte P_{AG} nach dem Ausricht- und Greifprozess gegliedert nach den Eckpunkten $P_{AG,1..4}$ (links) und gegliedert nach Unter- und Übermaß (rechts)

Die deutlichen Cluster bestätigen auch die statistische Auswertung der X_{AG} - und Y_{AG} -Koordinaten der einzelnen Punkte, die mit der Minitab Statistical Software durchgeführt wurde. Hierzu werden die Koordinaten auf deren Haupteffekte und deren statistische Signifikanz untersucht. Exemplarisch finden sich die Haupteffektdiagramme sowie die Paretdiagramme für den standardisierten Effekt für die Punkte $P_{AG,1}$ und $P_{AG,2}$ in Abbildung 6-13, die Punkte $P_{AG,3}$ und $P_{AG,4}$ finden sich im Anhang in Abbildung 0-2.



Legende:

- A: Aktivmaterial
- B: Massenbelastung
- ▲ C: Verdichtungsgrad
- ▼ D: Geometrische Abmaße
- ◆ E: Ablageseite

- - - - Mittelwert
- - - - Signifikanzgrenze

Abbildung 6-13: Haupteffektediagramme (links) und Paretdiagramme (rechts) für die X- und Y-Koordinaten der Punkte $P_{AG,1}$ und $P_{AG,2}$

Es zeigt sich deutlich, dass die Abmaße der Kathode den größten Einfluss auf die Koordinaten haben und für jeden Punkt die Signifikanzgrenze größtenteils sehr deutlich überschreiten. Die Steigung der Haupteffektdiagramme bei den Geraden für das Abmaß der Kathoden verdeutlicht, dass die Kathoden mit Übermaß durch die Schieber zentriert und durch den Greifer etwa gleichmäßig nach außen getragen wird. Bei der Versuchsdurchführung zeigt sich auch während der Zentrierung eine durch das Übermaß bedingte Aufwölbung der Kathode, wie in Abbildung 6-14 deutlich wird. Bei der Form des Aufwölbens lässt sich beobachten, dass die Auswirkung des Ableiters je nach vorheriger Coilaufwicklung visuell einen Einfluss hat. Je nachdem wie die Kathode auf den Ausrichttisch gelegt wird, prägt sich die Aufwölbung schwerpunktmäßig im Bereich des Ableiters aus (s. Abbildung 6-14 b), Seite B) bzw. im gegenüberliegenden Teil der Kathode aus (s. Abbildung 6-14 a), Seite A).

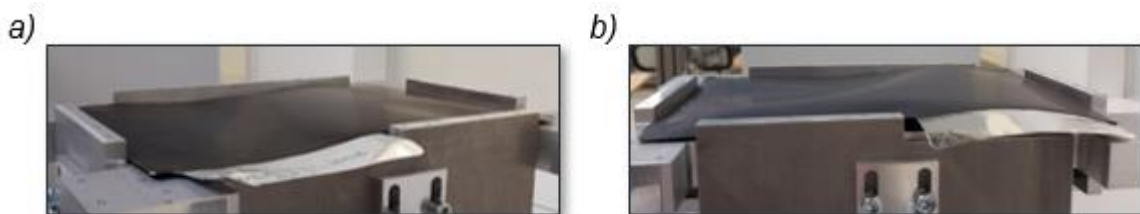


Abbildung 6-14: Durch das Übermaß bedingte, exemplarische Aufwölbungen der Kathode nach dem Ausrichten für Seite A in a) und Seite B in b)

Begründen lässt sich dies durch die Einwirkung des Ableiters. Durch das Kalandrieren sowie durch das Aufwickeln auf ein Coil werden in die Beschichtung insbesondere am Übergang der Beschichtung zum Ableiter Eigenspannungen eingebracht. Nach der Vereinzelung und dem Abtrennen der überschüssigen Aluminiumfolie können diese sich entspannen, nicht jedoch im Bereich des verbleibenden Ableiters. Dies führt zu verbleibenden Eigenspannungen, die die beschriebene Aufwölbung verursachen können. Weiterhin lässt sich allerdings auch feststellen, dass die Ausprägungen der Aufwölbungen stark streuen, da teilweise zufällig auftretende Ausprägungen der Aufwölbungen über die gesamte Kathodenfläche zu beobachten sind. Dies lässt sich auf die initiale Form der Kathode zurückführen, die, wie in Kapitel 5 untersucht, nicht immer homogen ist.

Bei den Kathoden mit Untermaß findet diese Aufwölbung nicht statt, da die Kathode bedingt durch das Untermaß lediglich positioniert, nicht aber durch die Schieber zusammengedrückt wird. Die initiale Form der Kathode bleibt somit bis zum Greifprozess erhalten.

Es ist allerdings zu beobachten, dass die Y_{AG} -Koordinaten der beiden Punkte $P_{AG,1}$ und $P_{AG,4}$ einen deutlich geringeren standardisierten Effekt aufweisen, als die Y_{AG} -Koordinaten der Punkte $P_{AG,2}$ und $P_{AG,3}$. In Absolutwerten beträgt die Differenz zwischen den beiden Faktorstufen bei $P_{AG,1}$ 0,34 mm und bei $P_{AG,4}$ 0,2 mm sowie bei $P_{AG,2}$ 1,02 mm und bei $P_{AG,3}$ 1,15 mm. Erklären lässt sich dies durch die initiale Positionierung der Kathoden vor dem Ausrichtprozess. Sie werden so positioniert, dass die Strecken $P_{AG,1}P_{AG,2}$ und $P_{AG,4}P_{AG,1}$ einen Überlapp zum Ausrichttisch haben und die Schieber beim Ausrichten dort zuerst Kontakt herstellen. Sobald die Schieber am Ausrichttisch stoppen, bleiben auch die Kathoden dort. Somit kommen die Y_{AG} -Koordinaten $P_{AG,1}$ und $P_{AG,4}$ sehr nahe an deren ideale Position, während bei den Kathoden mit Untermaß die Punkte $P_{AG,2}$ und $P_{AG,3}$ relativ weit von deren idealen Positionen entfernt bleiben.

In x_{AG} -Richtung zeigt sich der Effekt nicht, was zunächst verwunderlich ist. Erklären lässt sich dies jedoch mit der Bandstahlschnittvereinzelnung der Kathoden. In Laufrichtung treten bedingt durch die Kalandrierung und Coilbiegung stärkere Welligkeiten auf als quer zur Laufrichtung. Diese Welligkeiten wiederum sorgen für größere Schwankungen in den Längenabmaßen, wodurch der Effekt nicht herausgearbeitet werden kann.

Bei der Beurteilung der weiteren Faktoren zeigt sich, dass das Aktivmaterial und die Beschichtungsdicke keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis haben. Die beiden Faktoren Ablageseite sowie Verdichtungsgrad zeigen sich bei einigen Koordinaten knapp über der Signifikanzgrenze. Im Hinblick auf die Streuung der Messergebnisse ist die geringe Überschreitung der Signifikanzgrenze allerdings kritisch zu hinterfragen. Es fällt auf, dass sich die Streuung der Messungen der Eckpunktkoordinaten mit etwa $\pm 0,5$ mm insgesamt am oberen Ende der anvisierten Stapelgenauigkeit befindet. Teilweise kann die Streuung zunächst auf das Aufwölben der Kanten und Eckpunkte der Kathodenblätter mit den sich einstellenden Höhenunterschieden zurückgeführt werden, die sich je nach Eigenspannungen der Kathode durch den Druck des Greifers unterschiedlich ausprägen. Hierauf wird in Kapitel 6.5.2 nochmals detaillierter eingegangen. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass auch die Längen- und Breitenmaße der Kathode trotz gleichem Bandstahlschnittwerkzeug leicht schwanken können, da bei der vorhandenen Bandstahlschnitanlage keine definierte Bahnzugspannung aufgebracht werden kann.

Ein weiterer Einfluss kann auf die Schnittkantenqualität der Kathoden zurückgeführt werden. Nach (Jansen & Kandula et al. 2020) bilden diese generell keine perfekt gerade, rechteckige Schnittkante aus, sondern durch Delamination des Aktivmaterials vom Substrat und durch die Substratbiegung bzw. Gratbildung entstehen Schrägen und Rundungen, was bei Sichtung der 3D-Scans so auch bestätigt werden kann. Insbesondere führt hierbei allerdings auch der Bandstahlschnitt zu einer deutlich schlechteren Schnittkante im Vergleich zu der Vereinzelung mittels einer Feinstanze, wie Abbildung 6-15 verdeutlicht.

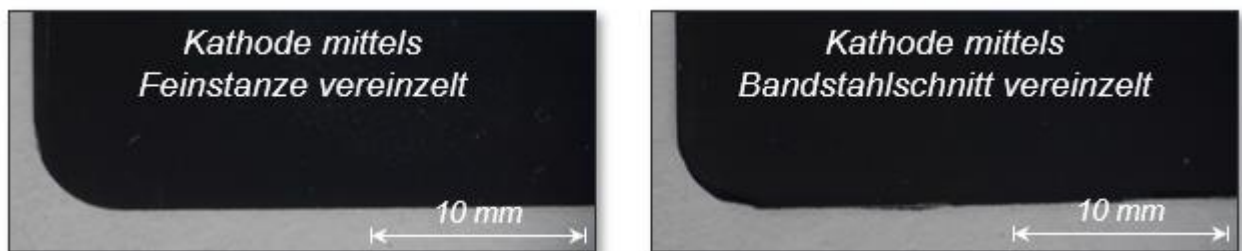


Abbildung 6-15: Makroskopischer Vergleich der Schnittkanten einer Kathode mittels Feinstanze (links) bzw. mittels Bandstahlschnitt (rechts) vereinzelt

Bedingt durch die Qualität der Schnittkanten werden zunächst bei der manuell durchgeführten Definition der Lotebenen während der Messauswertung leichte Ungenauigkeiten eingebracht, da eine virtuelle Ebene in die Kante gefittet werden muss. Darüber hinaus führen die Schnittkanten durch ihre Geometrie selbst zu einer Streuung bei der Positionierung, da hierbei ein mechanischer Kontakt zwischen Kante und Schieber realisiert werden muss. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, erfolgt eine detaillierte Untersuchung des Schnittkanteneinflusses. Hierzu werden Kathoden mittels Bandstahlschnitt sowie mittels Feinstanze vereinzelt und entsprechend der Versuchsbeschreibung in Kapitel 6.3.1 ausgerichtet, gegriffen und vermessen sowie anschließend miteinander verglichen. Es wird eine Feinstanze verwendet, die von (Baumeister 2017, S. 100) mit der Firma Groz-Beckert KG entwickelt wurde und einen Schneidspalt von 1-3 μm aufweist (Baumeister 2017, S. 133). Da die Feinstanze nur für das Nennmaß des Kathodenblatts vorliegt, wird dieses Maß festgelegt. Alle weiteren Parameter finden sich in Tabelle 6-6.

Tabelle 6-6: Parameter für die Untersuchung des Schnittkanteneinflusses

Vereinzelungsart	Aktivmaterial	Massenbelastung	Verdichtungsgrad	Abmaße	Ablageseite	Replikationen
Bandstahlschnitt	NMC 811	41,6 mg cm ⁻²	15 %	Nennmaß: $l_K = 208 \text{ mm}$ $b_K = 135 \text{ mm}$	Seite B	6
Feinstanze	NMC 811	41,6 mg cm ⁻²	15 %	Nennmaß: $l_K = 208 \text{ mm}$ $b_K = 135 \text{ mm}$	Seite B	5

Die Auswertung der 3D-Scans erfolgt wie bereits beschrieben, sodass für jeden Punkt X_{AG} - und Y_{AG} -Koordinaten vorliegen. Anschließend wird für jede Kathodenecke der jeweiligen Vereinzelungsart das arithmetische Mittel für die jeweilige X_{AG} - und Y_{AG} -Koordinate gebildet und daraus der Mittelpunkt $P_{M,1..4}$ für die jeweilige Kathodenecke bestimmt. Zu dem jeweiligen Mittelpunkt $P_{M,1..4}$ wird anschließend von jedem Messpunkt die euklidische Distanz $d(P_{AG}, P_M)$ mittels Formel 6-1 berechnet, wobei X_{AG} und Y_{AG} die jeweiligen Koordinaten der Messungen und X_M und Y_M die berechneten Koordinaten des Mittelpunkts P_M sind.

$$d(P_{AG}, P_M) = \sqrt{(Y_{AG} - Y_M)^2 + (X_{AG} - X_M)^2} \tag{Formel 6-1}$$

Die euklidische Distanz wird anschließend genutzt, um die Streuung der Messung zu beschreiben. In Abbildung 6-16 ist für jede Kathodenecke $P_{AG,1..4}$ die Streuung der euklidischen Distanz $d(P_{AG}, P_M)$ des Bandstahlschnitts (BSS) mit der der Feinstanze (FS) gegenübergestellt.

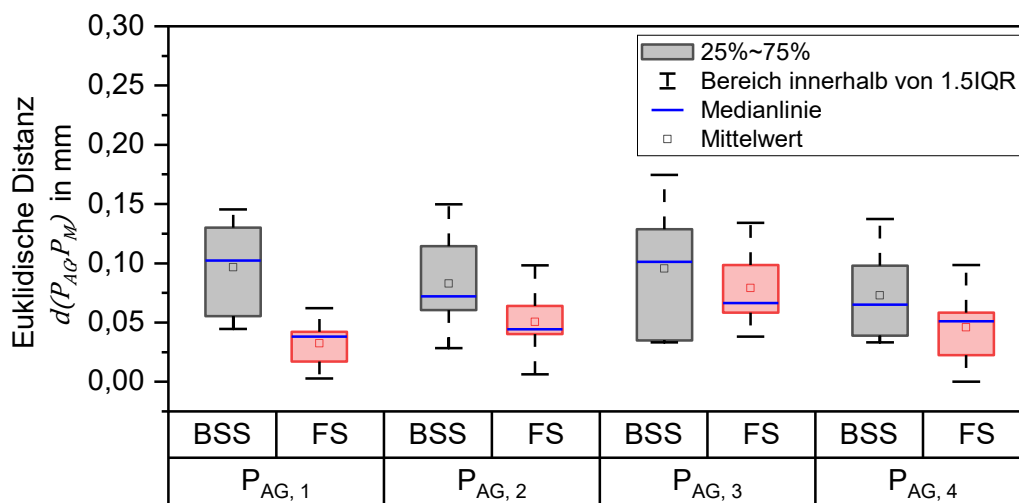


Abbildung 6-16: Gegenüberstellung der Streuung der euklidischen Distanz von P_{AG} und P_M für jede Kathodenecke

Die Gegenüberstellung von Bandstahlschnitt und Feinstanze zeigt, dass alle Mittelwerte der feingestanzten Kathoden unter den Werten der Kathoden liegen, die mittels Bandstahlschnitt vereinzelt wurden. Des Weiteren ist die jeweilige Streuung der feingestanzten Kathoden bis auf $P_{AG,4}$, wo sie etwa gleich ist, deutlich geringer. Prozentual entsprechen die Mittelwerte der feingestanzten Kathodenblätter 33,5 % bei $P_{AG,1}$, 61,1 % bei $P_{AG,2}$, 82,8 % bei $P_{AG,3}$ und 63,1 % bei $P_{AG,4}$ den jeweiligen Mittelwerten der mittels Bandstahlschnitt vereinzelt Kathoden. Es kann geschlossen werden, dass die Eckpunkte der feingestanzten Kathodenblätter deutlich näher beisammen liegen. Somit kann auch die Hypothese bestätigt werden, dass die Qualität der Schnittkanten einen Einfluss auf die Streuung der Messungen hat.

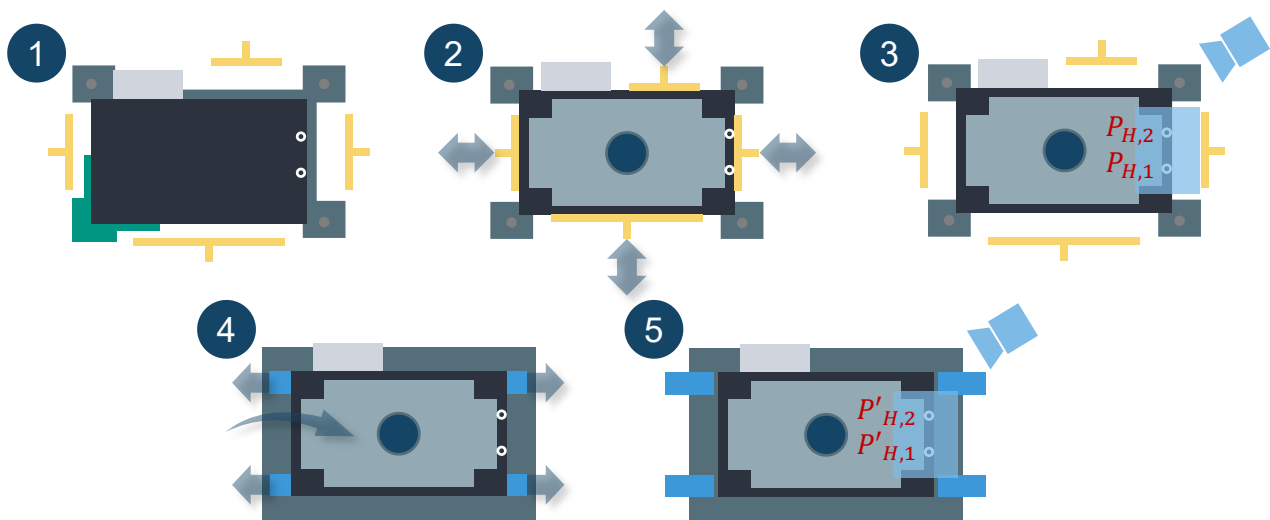
Zusammenfassend zeigt sich, dass einige Aspekte die Messungen der Eckpunktpositionen nach dem Ausricht- und Greifprozess beeinflussen. Diese sind fertigungsbedingte Schwankungen der Kathodenblattabmaße, sich aufwölbende Kanten der Kathodenblätter sowie die Qualität der Schnittkanten. Insbesondere die aufwölbenden Kanten der Kathode lassen erwarten, dass prinzipbedingt Werte gemessen werden, die sich nach der späteren Fixierung durch die Niederhalter ändern. Aus diesem Grund muss an dieser Stelle von einer Aussage hinsichtlich des absoluten Einflusses auf die Stapelgenauigkeit abgesehen werden, was in Kapitel 6.5.2 auch nochmals aufgegriffen wird. Darüber hinaus zeigt sich jedoch, dass die Qualität der Schnittkanten durch den mechanischen Kontakt bei der Ausrichtung einen wesentlichen Beitrag zur Streuung der Messung beitragen. Vergleichende Versuche verdeutlichen, dass die Streuung von feingestanzten Kathodenblätter im Mittel etwa 40 % geringer ausfällt als bei Kathodenblätter, die mittels Bandstahlschnitt vereinzelt wurden.

6.4 Einfluss des Handhabungsprozesses

Als nächster Prozessschritt ist die Handhabung der Kathode zu untersuchen. Im Fokus steht insbesondere die Ablage der Kathode auf die Niederhalter, wodurch sich die Kathode an den Ecken prozessbedingt aufwölbt. Im Folgenden wird daher untersucht, ob eine Verschiebung der Kathode relativ zum Greifer durch den Einfluss der Ablage auf die Niederhalter entsteht. Hierfür werden in Kapitel 6.4.1 die Versuchsdurchführung und die Auswertung beschrieben sowie in Kapitel 6.4.2 die Ergebnisse diskutiert und bewertet.

6.4.1 Experimentelle Versuchsdurchführung und Auswertung

Zur Untersuchung des Handhabungsprozesses wird die initiale Position der Kathode im gegriffenen Zustand relativ zum Greifer vermessen. Nach Ablage auf den Stapeltisch wird die Position nochmals vermessen und mit der initial gemessenen Position verglichen. Der entsprechende Versuchsablauf ist schematisch in Abbildung 6-17 dargestellt.



Legende:



Abbildung 6-17: Versuchsablauf zur Untersuchung des Handhabungsprozesses

Die einzelnen Versuchsschritte können im Detail wie folgt beschrieben werden:

1. Aufkleben von Referenzpunkten auf die zu vermessende Kathode, die auf dem Ausrichttisch liegt;
2. Ausrichten und Greifen der Kathode, Ansaugen der Kathode durch den Greifer und Entfernen der Schieber;
3. 3D-Scan der initialen Position der Kathode im gegriffenen Zustand relativ zum Greifer mittels GOM ATOS Core 135;
4. Handhabung und Ablage der Kathode auf den Stapeltisch mit den Niederhalter und Entfernen der Niederhalter ohne die Kathode zu greifen;
5. Erneuter 3D-Scan der Position der Kathode relativ zum Greifer mittels GOM ATOS Core 135.

Anschließend werden die Aufnahmen mittels der GOM Inspect Software 2022 ausgewertet. Hierfür wird in beiden 3D-Scans das Koordinatensystem auf den Greifer in den

gleichen Ursprung und der gleichen Ausrichtung gelegt. Anschließend werden die Koordinaten der auf die Kathode aufgeklebten Referenzpunkte $P_{H,1}$ und $P_{H,2}$ gemessen und die euklidischen Distanzen $d(P_{H,1}, P'_{H,1})$ und $d(P_{H,2}, P'_{H,2})$ als Zielgrößen berechnet.

6.4.2 Bewertung des Handhabungsprozesses

Abbildung 6-18 zeigt die Auswertung der euklidischen Distanz aufgeteilt auf die Versuche und die jeweiligen Replikationen.

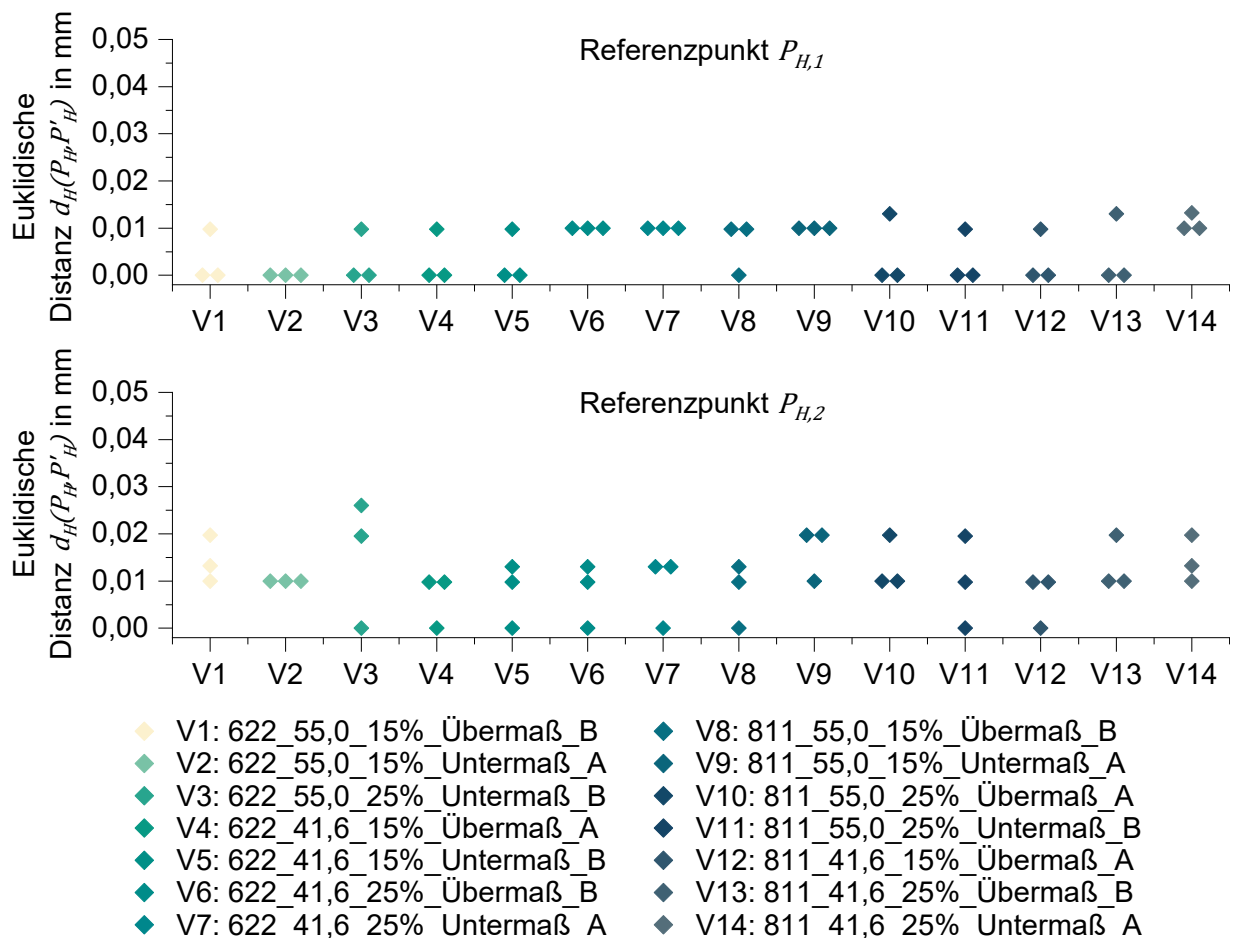


Abbildung 6-18: Euklidische Distanz der Referenzpunkte $P_{H,1}$ (oben) und $P_{H,2}$ (unten) als Maß für die Verschiebung der Kathode während des Handhabungsprozesses

Es wird deutlich, dass während des Handhabungsprozesses Verschiebungen zwischen 0,000 mm und 0,028 mm auftreten. Auffällig ist, dass bei Punkt $P_{H,2}$ stärkere Verschiebungen auftreten als bei Punkt $P_{H,1}$. Dies zeigt auch das arithmetische Mittel über alle Messungen von 0,006 mm bei $P_{H,1}$ und 0,011 mm bei $P_{H,2}$. Begründen lässt sich das

mit dem Einfluss des Ableiterfährchens, zu dem $P_{H,2}$ näher als $P_{H,1}$ liegt. Dort tritt während des Greifens eine inhomogenere Spannungsverteilung als im Rest der Kathode auf, was die Verschiebung der Kathode begünstigt, sobald der Kontakt zum Tisch beendet bzw. erneut hergestellt wird.

Da die Messauflösung des GOM-Messsystems $\pm 0,01$ mm beträgt, ist eine weitere Auswertung der Messwerte jedoch nicht zielführend. Die zu erzielende Stapelgenauigkeit liegt im Bereich von $\pm 0,1$ bis $\pm 0,5$ mm, sodass es den Schluss zulässt, dass die Verschiebungen durch den Handhabungsprozess als sehr gering einzustufen sind.

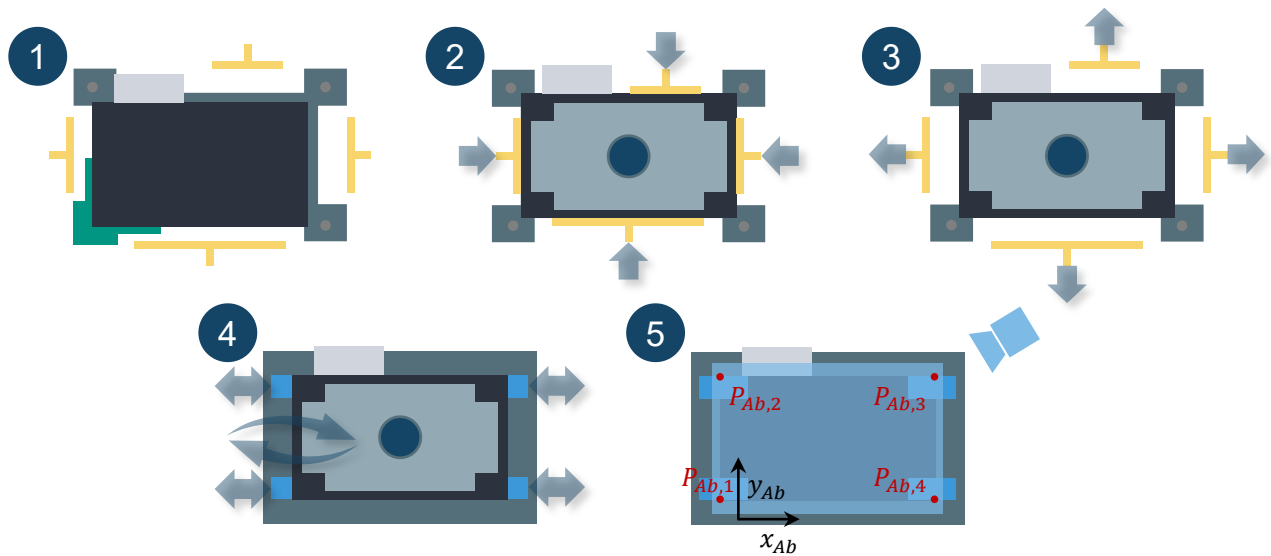
Nicht auszuschließen ist ein möglicher Einfluss der Dynamik bei der Handhabung in den geforderten Produktionsgeschwindigkeiten für größere Stückzahlen, was allerdings im Rahmen der Arbeit aufgrund der Fokussierung auf die Strukturparameter nicht untersucht wurde.

6.5 Einfluss des Ablageprozesses

Zu Bewertung der Stapelgenauigkeit ist es erforderlich zu verstehen, welchen Einfluss die initiale Ablage der Kathode auf den Stapel sowie deren Fixierung durch die Niederhalter hat. Nach Abschluss des Ablageprozesses wird die maximale flächige Fixierung der Kathode erreicht, wodurch zu erwarten ist, dass mögliche Wölbungen flächig auf den Stapel gepresst werden. Um den Einfluss des Stapels zunächst auszublenden, wird die Ablage der Kathode auf den leeren Stapeltisch durchgeführt. Hierzu wird in Kapitel 6.5.1 das experimentelle Vorgehen sowie die Auswertung vorgestellt und anschließend in Kapitel 6.5.2 die Ergebnisse diskutiert und bewertet. Die in diesem Kapitel dargestellten Inhalte wurden im Rahmen der angeleiteten Abschlussarbeit (A_Fuchs 2023) erarbeitet und für die vorliegende Arbeit vertieft.

6.5.1 Experimentelle Versuchsdurchführung und Auswertung

Für die Versuchsdurchführung werden die bereits beschriebenen Prozesse des Ausrichtens und Greifens sowie der Handhabung durchgeführt. Anschließend wird die Kathode auf dem Stapeltisch abgelegt, fixiert und vermessen. Abbildung 6-19 stellt den Versuchsablauf schematisch dar.



Legende:



Abbildung 6-19: Versuchsablauf zur Untersuchung des Ablageprozesses in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Die einzelnen Versuchsschritte können wie folgt beschrieben werden:

1. Manuelle Platzierung der Kathode auf dem Ausrichttisch mittels mechanischer Positionierhilfe. Die Kathode hat hierbei einen leichten Überlapp zur linken und unteren Seite des Ausrichttisches;
2. Ausrichten der Elektrode und Absenken des Greifers;
3. Ansaugung der Kathode durch den Greifer und anschließendes Entfernen der Schieber;
4. Handhabung und Ablage der Kathode auf den Stapeltisch mit Niederhaltern, Verfahren der Niederhalter mit anschließender Fixierung der Kathode und Entfernen des Greifers;
5. 3D-Scan der mit Niederhaltern fixierten Kathode mittels GOM ATOS Core 135.

Die Auswertung der Scans erfolgt wiederum mittels GOM Inspect Software 2022 und entspricht dem beschriebenen Ablauf in Kapitel 6.3.1 für die hier relevanten Kathodeneckpunkte $P_{Ab,1..4}(X_{Ab,1..4}, Y_{Ab,1..4})$.

6.5.2 Bewertung des Ablageprozesses

Für den Ablageprozess ergibt sich zunächst ein ähnliches Bild wie bereits nach dem Ausricht- und Greifprozess in Kapitel 6.3.2. Wie in Abbildung 6-20 links zu sehen, lassen sich ebenso bei $P_{Ab,2}$ und $P_{Ab,3}$ visuell zwei Cluster erkennen, die sich bei weiterer Auswertung in das Kathodenüber- und Kathodenuntermaß einteilen lassen, s. Abbildung 6-20 rechts.

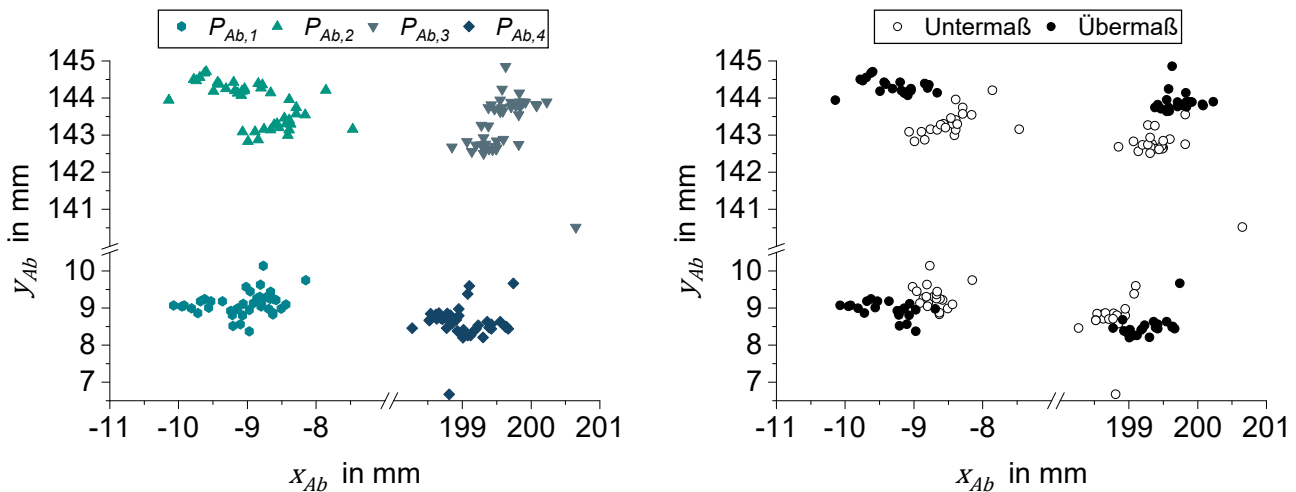
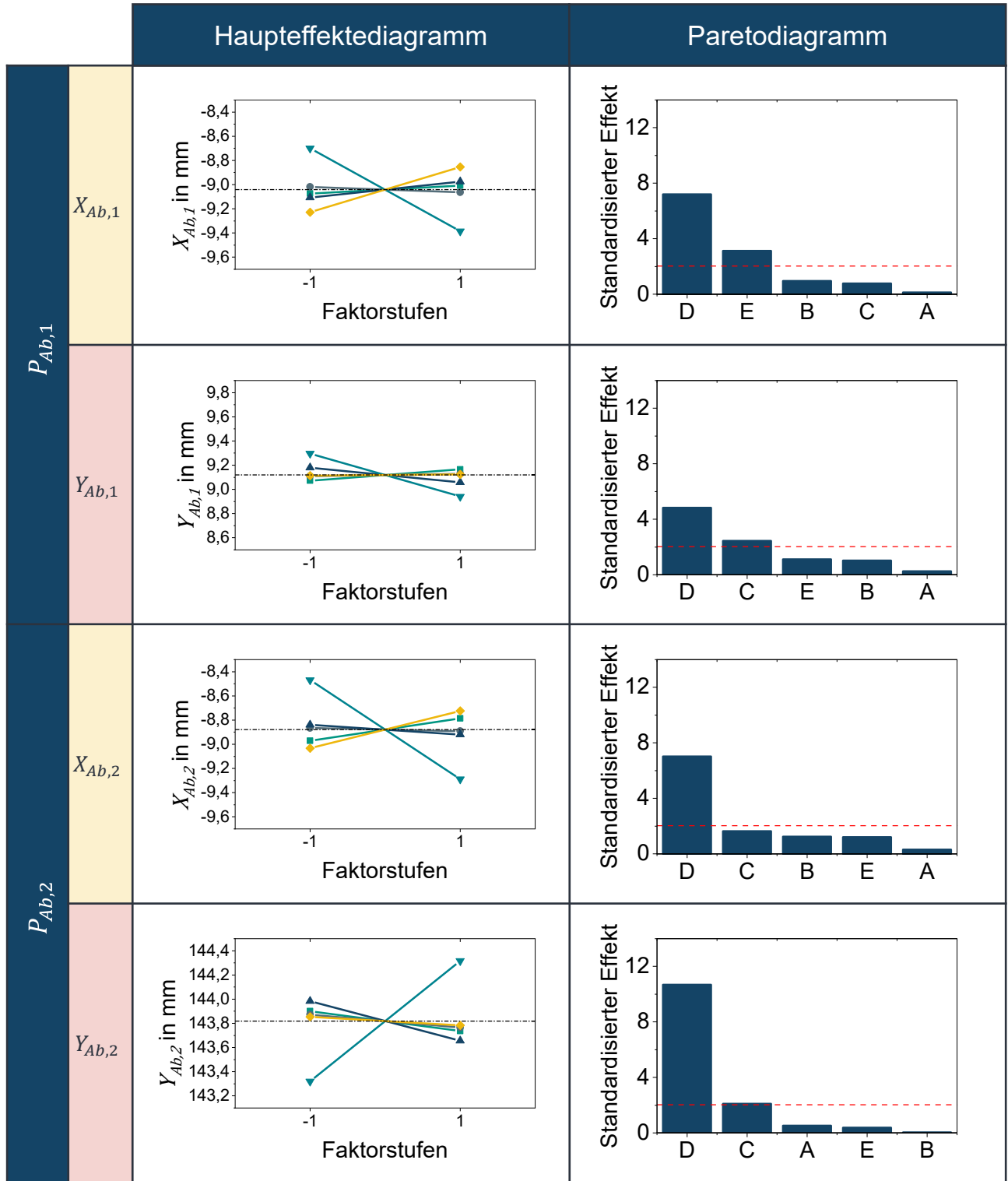


Abbildung 6-20: Gemessene Kathodeneckpunkte P_{Ab} nach dem Ablageprozess gegliedert nach den Eckpunkten $P_{Ab,1..4}$ (links) und gegliedert nach Unter- und Übermaß (rechts) in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Auch die Auswertung der Haupteffekte sowie der Paretdiagramme mittels der Minitab Statistical Software bestätigen den signifikanten Einfluss der Kathodenabmaße in fast allen X_{Ab} - und Y_{Ab} -Koordinaten. Exemplarisch sind hierzu die Auswertungen der beiden Punkte $P_{Ab,1}$ und $P_{Ab,2}$ in Abbildung 6-21 dargestellt, $P_{Ab,3}$ und $P_{Ab,4}$ finden sich im Anhang in Abbildung 0-3.



Legende:

- A: Aktivmaterial
- B: Massenbelastung
- ▲ C: Verdichtungsgrad
- ▼ D: Geometrische Abmaße
- ◆ E: Ablageseite

- - - - Mittelwert
- - - - Signifikanzgrenze

Abbildung 6-21: Haupteffektediagramme (links) und Paretdiagramme (rechts) für die X- und Y-Koordinaten der Punkte $P_{Ab,1}$ und $P_{Ab,2}$

Wie bereits bei dem Ausricht- und Greifprozess zeigt sich in den Paretodiagrammen, dass die geometrischen Abmaße der Kathode den größten, signifikanten Einflussfaktor auf die Positionierung der Eckpunkte darstellen. Die Faktoren Ablageseite, Aktivmaterial und Verdichtungsgrad überschreiten zwar bei einigen Koordinaten die Signifikanzgrenze, allerdings nur zu einem sehr geringen Anteil. Im Hinblick auf die diskutierte Streuung der Messungen kann wie zuvor nicht sicher davon ausgegangen werden, dass diese einen signifikanten Einfluss haben. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Y_{Ab} -Koordinate des Punktes $P_{Ab,4}$ keine signifikanten Ausprägungen eines Einflussfaktors zeigt. In Kombination mit den zugehörigen X_{Ab} -Koordinaten lassen sich jedoch in Abbildung 6-20 rechts visuell deutlich die Cluster identifizieren.

Bei der Versuchsdurchführung fällt auf, dass im Vergleich zum Ausricht- und Greifprozess die Ecken und Ränder der Kathodenblätter nach dem Ablageprozess durch die Niederhalter flächig auf den Boden gedrückt werden, s. Abbildung 6-22 rechts. Auch der mittige Teil der Kathode wird eben auf dem Tisch fixiert. Nach dem Ausricht- und Greifprozess war die Kathode lediglich in der Mitte durch den Greifer fixiert, sodass sich je nach Eigenspannungszustand die Randbereiche aufwölben können, s. Abbildung 6-22 links.

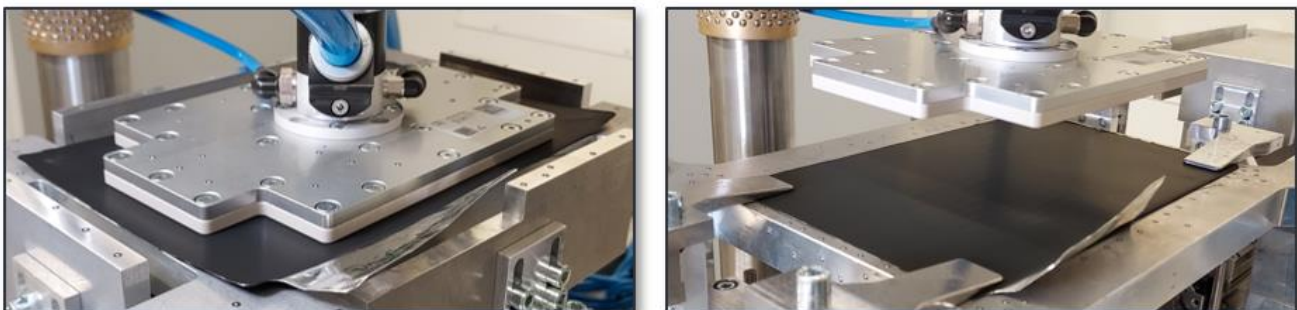


Abbildung 6-22: Vergleich der Geometrie der Kathode nach dem Ausricht- und Greifprozess mit Aufwölben der Ecken (links) und dem Ablageprozess mit Hochklappen des Ableiterfähnchens (rechts)

Es zeigt sich, dass die Welligkeiten der Kathode, die in Kapitel 5 gemessen wurden, durch die Fixierung der Niederhalter nicht mehr auftreten. Bemerkenswert ist aber die Beobachtung, dass das Ableiterfähnchen nach der Fixierung mit den Niederhaltern häufig stark nach oben klappt, s. Abbildung 6-22 rechts. Erklären lässt sich dies mit dem aus der Blechbearbeitung bekannten „Knackfroscheffekt“ (Angrosch & Zigo et al. 2016). Durch das Kalandrieren wurde der beschichtete Teil der Kathode gelängt, das

unbeschichtete Ableiterföhnchen jedoch nicht. Im Randbereich zwischen unbeschichteter Aluminiumfolie und beschichtetem Bereich werden dadurch Eigenspannungen eingebracht, die sich nach der Vereinzelung dort entspannen können, wo die Aluminiumfolie abgetrennt wurde, nicht jedoch im Bereich des Ableiterföhnchens. Durch die Fixierung der Kathode mit den Niederhaltern wird der Übergang zwischen Ableiterföhnchen und Beschichtung gestreckt. Leichte Unebenheiten des Ableiterföhnchens drücken dieses nach oben, sodass der „Knackfrosch“ ausgelöst wird und das Ableiterföhnchen nach oben klappt.

Es ist zu erwarten, dass sich die Wölbungen der Kathode an den Rändern und Ecken nach dem Ausrichten und Greifen sowie die sich über die gesamte Kathode erstreckende Ebenheit nach der Fixierung durch die Niederhalter auch in den Messungen widerspiegelt. Abbildung 6-23 zeigt hierzu die Differenz der mittleren Kantenlänge der Kathoden zwischen Ausricht- und Greifprozess sowie dem Ablageprozess sowohl für das Unter- als auch das Übermaß. Die Kantenlängen wurden auf Basis der gemessenen Eckpunkte berechnet. Die positive Ausprägung der Differenz zeigt, dass die Maße nach der Ablage und der Fixierung durch die Niederhalter im Mittel durchweg größer sind. Darauf basierend kann die Aussage getroffen werden, dass die gemessenen Eckpunkte nach dem Ausricht- und Greifprozess nicht abschließend für eine finale Beurteilung der Stapelgenauigkeit herangezogen werden können, da diese sich nach der Ablage auf den Stapel nochmal ändern können. Insbesondere zeigt sich auch nochmal der Einfluss des Ableiterföhnchens insofern, dass sich die gemessene Kantenlänge sowohl beim Unter- als auch beim Übermaß auf der Strecke P_2P_3 nach dem Ablageprozess im Vergleich zum Ausricht- und Greifprozess am deutlichsten unterscheidet.

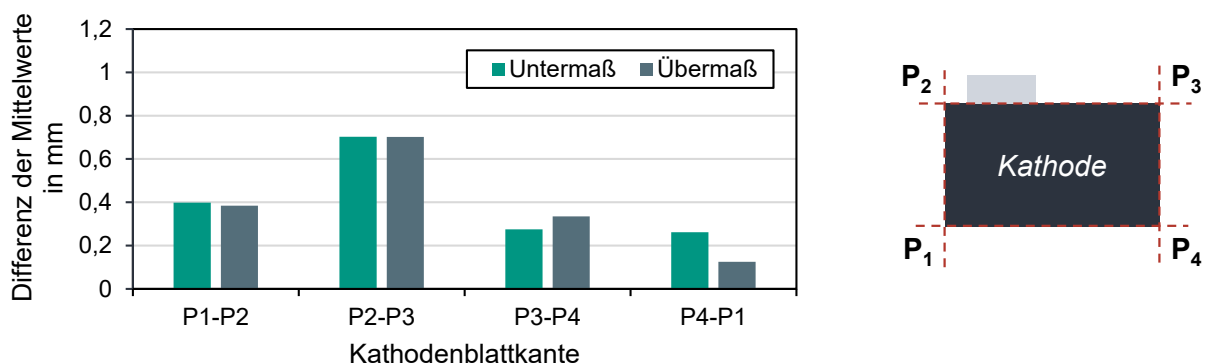


Abbildung 6-23: Positive Differenz der mittleren Kathodenblattkantenlänge zwischen dem Ausricht- und Greifprozess sowie dem Ablageprozess als Indikator für die flächigere Fixierung nach dem Ablageprozess

Sowohl im Ausricht- und Greifprozess in Kapitel 6.3 als auch beim Ablageprozess in Abbildung 6-21 wird ersichtlich, dass das Maß der Kathode einen signifikanten Einfluss auf die Position der Eckpunkte hat. Insbesondere bei der Ablage ist zu erwarten, dass dies einen deutlichen Einfluss auf die resultierende Stapelgenauigkeit besitzt. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Einfluss der Maßabweichung auf die Eckpunktposition nach dem Ablageprozess detaillierter untersucht.

Hierzu werden Kathoden mit vier unterschiedlichen Maßabweichungen gefertigt und entsprechend der Versuchsbeschreibung in Kapitel 6.5.1 prozessiert. Die restlichen Parameter werden konstant gehalten. Tabelle 6-7 gibt hierzu den Überblick über die Parametereinstellungen.

Tabelle 6-7: Parameter für die Untersuchung des Maßeinflusses der Kathoden in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Vereinzelungsart	Aktivmaterial	Massenbeladung	Verdichtungsgrad	Abmaße	Ablageseite	Replikationen
Bandstahlschnitt	NMC 811	41,6 mg cm ⁻²	15 %	Untermaß 2: $l_K = 207 \text{ mm}$ $b_K = 134 \text{ mm}$	Seite B	6
				Untermaß 1: $l_K = 207,5 \text{ mm}$ $b_K = 134,5 \text{ mm}$		
				Nennmaß: $l_K = 208 \text{ mm}$ $b_K = 135 \text{ mm}$		
				Übermaß: $l_K = 209 \text{ mm}$ $b_K = 136 \text{ mm}$		

Die Auswertung der Versuche erfolgt nach der gleichen Art und Weise mit der GOM Inspect Software 2022. Abbildung 6-24 zeigt die Ergebnisse der Versuchsdurchläufe. Wie bereits zuvor werden die Eckpositionen der Kathoden dargestellt.

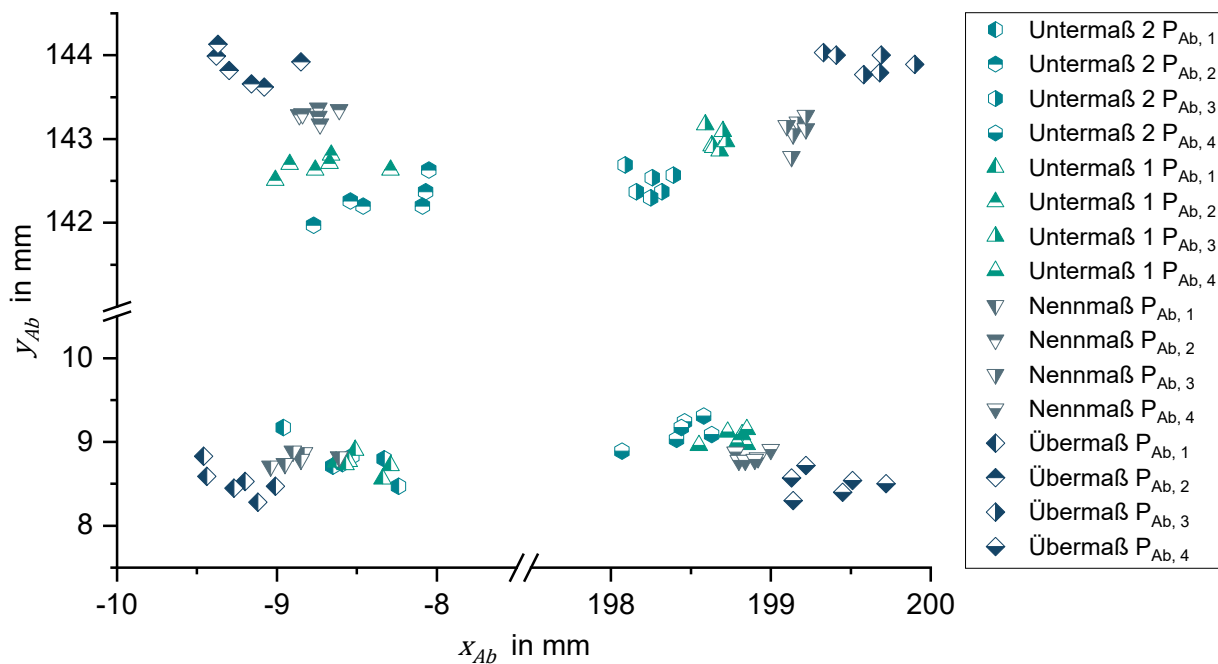


Abbildung 6-24: Gemessene Eckpunktpositionen der Kathoden nach dem Ablageprozess für vier Kathodenmaße in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Abbildung 6-24 zeigt zunächst, dass sich wie erwartet die unterschiedlichen Abmaße durch Clusterbildung deutlich voneinander unterscheiden lassen. Lediglich bei $P_{Ab,1}$ und $P_{Ab,4}$ gibt es vor allem bei den Untermaßen leichte Überlappungen, was sich jedoch auf die initiale Positionierung der Kathode mit Überhang auf die linke (P_1P_2) und untere (P_1P_4) Seite des Ausrichttischs vor dem eigentlichen Ausrichten zurückführen lässt. Die beiden dort ansetzenden Schieber haben zuerst Kontakt zur Elektrode und schieben diese in die Position. Ein Kontakt mit den anderen beiden Schiebern wird aufgrund des Untermaßes nicht hergestellt, was auch Aufnahmen des Prozesses mit einer Highspeed-Kamera zeigen. Bei den Kathoden mit Übermaß zeigt sich, dass diese sich von einem gedachten Mittelpunkt nach außen ausbreiten. Die Ursache liegt darin, dass sie im Ausricht- und Greifprozess zunächst zentriert werden und sich dann aufwölben. Diese Aufwölbung wird durch den Greifer nach unten gedrückt. Sobald die Schieber allerdings den Kontakt lösen, breiten sich die Eckpunkte entsprechend nach außen aus und werden auf dem Stapeltisch dann durch die Niederhalter fixiert. (A_Fuchs 2023)

Darüber hinaus zeigt sich, dass die Messdaten in Summe eine Stapelgenauigkeit von etwa ± 1 mm sowohl in x_{Ab} - als auch in y_{Ab} -Richtung erreichen, wenn entsprechende

Toleranzfenster in die vier Eckpunkte eingepasst werden. Dies entspricht nicht der geforderten Stapelgenauigkeit von $\pm 0,5$ mm, ist aber im Hinblick auf die gewählten Faktorstufen für die Abmaße der Kathodenblätter nicht anders zu erwarten.

Zur weiteren Analyse der Messdaten werden für die vier Faktorstufen der Kathodenabmaße jeweils eigene Toleranzfenster in die Eckpunkte der Messungen eingepasst, s. Tabelle 6-8.

Tabelle 6-8: Nach Kathodenmaß aufgeschlüsselte Streuung der jeweiligen Eckpunktpositionen der Kathodenblätter nach dem Ablageprozess

Kathodenabmaße	Eckpunkt	Streuung in mm		Ø Streuung in mm	
		x_{Ab} -Richtung	y_{Ab} -Richtung	x_{Ab} -Richtung	y_{Ab} -Richtung
Untermaß 2	$P_{Ab,1}$	$\pm 0,36$	$\pm 0,35$	$\pm 0,29$	$\pm 0,27$
	$P_{Ab,2}$	$\pm 0,36$	$\pm 0,33$		
	$P_{Ab,3}$	$\pm 0,15$	$\pm 0,20$		
	$P_{Ab,4}$	$\pm 0,28$	$\pm 0,21$		
Untermaß 1	$P_{Ab,1}$	$\pm 0,17$	$\pm 0,17$	$\pm 0,19$	$\pm 0,14$
	$P_{Ab,2}$	$\pm 0,36$	$\pm 0,15$		
	$P_{Ab,3}$	$\pm 0,07$	$\pm 0,16$		
	$P_{Ab,4}$	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$		
Nennmaß	$P_{Ab,1}$	$\pm 0,22$	$\pm 0,09$	$\pm 0,13$	$\pm 0,12$
	$P_{Ab,2}$	$\pm 0,13$	$\pm 0,10$		
	$P_{Ab,3}$	$\pm 0,06$	$\pm 0,25$		
	$P_{Ab,4}$	$\pm 0,11$	$\pm 0,07$		
Übermaß	$P_{Ab,1}$	$\pm 0,23$	$\pm 0,28$	$\pm 0,27$	$\pm 0,22$
	$P_{Ab,2}$	$\pm 0,27$	$\pm 0,26$		
	$P_{Ab,3}$	$\pm 0,29$	$\pm 0,13$		
	$P_{Ab,4}$	$\pm 0,30$	$\pm 0,21$		

Ausgehend vom Nennmaß zeigt sich, dass eine durchschnittliche Stapelgenauigkeit von $\pm 0,13$ mm bzw. $\pm 0,12$ mm erreicht werden kann, wenn keine Variation der Blattabmaße vorliegt. Entsprechend der Analyse für den Ausricht- und Greifprozess aus Kapitel 6.3.2 kann die verbleibende Streuung der Ergebnisse auf die Qualität der Schnittkanten sowie auf fertigungsbedingt leicht schwankenden Blattabmaße durch den Bandstahlschnitt zurückgeführt werden. Auffällig ist, dass das Nennmaß deutlich geringere Toleranzfenster ausbildet als sowohl das Unter- als auch das Übermaß. Für das Untermaß liegt der Grund darin, dass durch den mechanischen Ausrichtprozess die Kathodenblätter zwar durch die Schieber in Position geschoben werden, allerdings bedingt durch das Untermaß nicht vom gegenüberliegenden Schieber sofort abgebremst werden. Vielmehr entsteht die Bremswirkung durch die Reibung zwischen dem Kathodenblatt und der Tischoberfläche, was jedoch zu der erhöhten Streuung bei den Kathoden

mit Untermaß führt. Es zeigt sich zudem, dass eine geringere Ausprägung des Untermaßes zu einem kleineren Toleranzfenster, also zu einer geringeren Streuung der Messung, führt. Es ist somit anzunehmen, dass bei geringerem Untermaß zumindest teilweise bereits Kontakt zum gegenüberliegenden Schieber hergestellt wird, wodurch die Kathodenblätter abgebremst werden und so die Streuung reduziert wird.

Für die Kathodenblätter mit Übermaß liegt es nahe, dass die Ursache für die größeren Toleranzfenster ebenfalls im Ausrichtprozess liegt. Bedingt durch das Übermaß werden die Kathodenblätter zwischen den Schiebern eingeklemmt, was zu Aufwölbungen in den Kathodenblättern führt, s. Abbildung 6-14. Diese wiederum führen zu einer ungenaueren Aufnahme durch den Greifer, woraus die ungenauere Ablage auf den Stapeltisch erfolgt. Ergänzend ist anzumerken, dass sowohl im Unter- als auch im Übermaß auch die beiden Effekte Schnittkanteneinfluss und fertigungsbedingte Toleranzen Einfluss nehmen.

Zur weiteren Analyse der Messdaten hinsichtlich der Stapelgenauigkeit werden ausgehend vom Nennmaß Toleranzfenster über verschiedene Kathodenmaßgruppen gebildet, s. Tabelle 6-9.

Tabelle 6-9: Gruppierte Streuung der jeweiligen Eckpunktpositionen der Kathodenblätter nach dem Ablageprozess

Kathodenabmaße	Eckpunkt	Streuung in mm		Ø Streuung in mm	
		x_{Ab} -Richtung	y_{Ab} -Richtung	x_{Ab} -Richtung	y_{Ab} -Richtung
Nennmaß & Untermaß 1	$P_{Ab,1}$	±0,38	±0,17	±0,32	±0,26
	$P_{Ab,2}$	±0,36	±0,43		
	$P_{Ab,3}$	±0,32	±0,25		
	$P_{Ab,4}$	±0,23	±0,19		
Nennmaß & Untermaß 1 & Untermaß 2	$P_{Ab,1}$	±0,40	±0,35	±0,48	±0,45
	$P_{Ab,2}$	±0,48	±0,70		
	$P_{Ab,3}$	±0,57	±0,49		
	$P_{Ab,4}$	±0,47	±0,27		
Nennmaß & Übermaß	$P_{Ab,1}$	±0,43	±0,31	±0,42	±0,43
	$P_{Ab,2}$	±0,39	±0,48		
	$P_{Ab,3}$	±0,40	±0,62		
	$P_{Ab,4}$	±0,47	±0,31		

Es zeigt sich, dass eine gemeinsame Betrachtung von Nennmaß und Untermaß 1 weiterhin die geforderte Stapelgenauigkeit von ±0,5 mm erfüllen kann. Im Versuchsplan ist das Untermaß 1 im Vergleich zum Nennmaß so ausgelegt, dass sich rein rechnerisch eine theoretische Abweichung von maximal ±0,25 mm einstellen müsste (vgl. Untermaß 1 mit $l_K = 207,5 \text{ mm}$ und $b_K = 134,5 \text{ mm}$ zu Nennmaß mit $l_K = 208 \text{ mm}$ und

$b_K = 135 \text{ mm}$). Bedingt durch die bereits diskutierten Prozesseinflüsse zeigen sich jedoch maximale Streuungen von bis zu $\pm 0,43 \text{ mm}$. Die gemeinsame Betrachtung von Nennmaß, Untermaß 1 und Untermaß 2 ergibt eine maximale Streuung von bis zu $\pm 0,7 \text{ mm}$ gegenüber der theoretischen Abweichung von $\pm 0,5 \text{ mm}$ auf Basis der Faktorstufenauslegung. Bei der Kombination von Nennmaß und Übermaß liegt die maximale Streuung mit $\pm 0,62 \text{ mm}$ ebenfalls über der rechnerischen Abweichung von $\pm 0,5 \text{ mm}$. Es kann somit zunächst der naheliegende Schluss gezogen werden, dass toleranzbehaftete Kathodenmaße einen essentiellen Einfluss auf die Ablagegenauigkeit der Kathodenblätter auf den Stapel haben. Die Analyse zeigt auch, dass die Ursache hierfür bereits im mechanischen Ausrichtprozess liegt. Zudem kann aufgezeigt werden, dass bei den durchgeführten Versuchen zusätzlich zu den rechnerisch erwartbaren Abweichungen aufgrund der unterschiedlichen Kathodenmaße etwa $\pm 0,12 \text{ mm}$ bis $\pm 0,2 \text{ mm}$ durch zusätzliche Prozesseinflüsse hinzukommen.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass im Ablageprozess die Abmaße der Kathoden den größten Einfluss auf die Ablageposition der Kathodenblätter auf den Stapeltisch zeigen. Ursächlich findet die Beeinflussung der Ablageposition zwar bereits im vorherigen Ausricht- und Greifprozess statt, jedoch kann die resultierende Ablageposition erst nach der flächigen Fixierung durch die Niederhalter korrekt gemessen werden. Weitere Untersuchungen des Abmaßeinflusses auf die Ablageposition zeigen, dass sowohl die Schnittkanten als auch fertigungsbedingt leicht schwankende Blattabmaße innerhalb einer Faktorstufe das resultierende Toleranzfenster beeinflussen. Zuzüglich zeigt sich bei den Kathodenblätter mit Untermaß, dass das abschließende unkontrollierte Gleiten des Kathodenblatts bei der Ausrichtung durch die Schieber einen negativen Einfluss auf die Streuung der Ablagegenauigkeit hat, während bei Übermaß das Einklemmen der Kathodenblätter sich negativ auf die Streuung auswirkt.

6.6 Einfluss der Niederhalter-Greifer-Interaktion mit dem Stapel

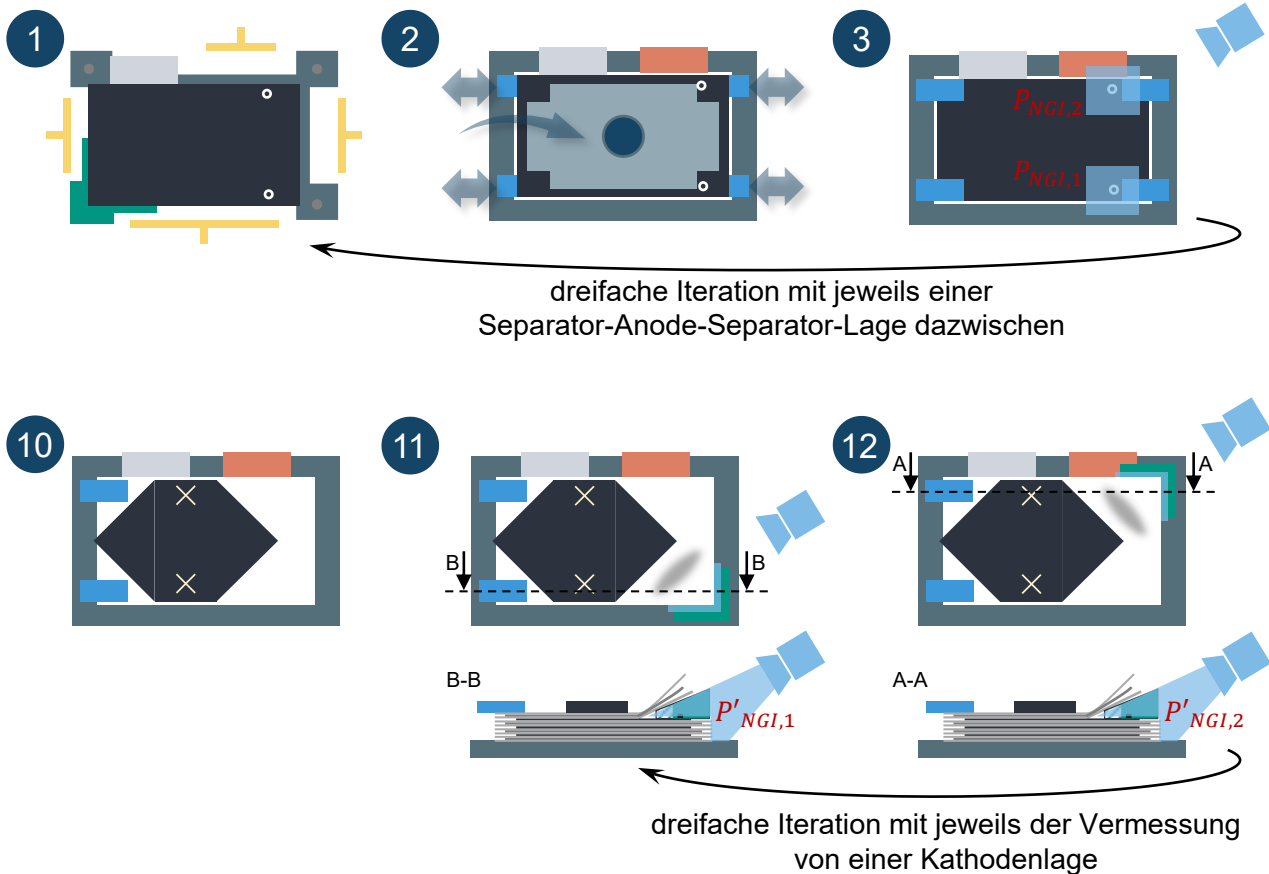
Zum Abschluss der experimentellen Untersuchung der Einzelblattstapelbildung wird die Interaktion zwischen Niederhalter, Greifer und dem Stapel betrachtet. Insbesondere durch das Wechselspiel des Greifers mit den Niederhaltern kann es zu einer Verschiebung der einzelnen Komponenten des Stapels kommen. (Weinmann 2022, S. 115) beschreibt diesen Effekt und begründet ihn mit der Auffächerung des Stapels in den Randbereichen, was durch die Fixierung des Stapels mittels Greifer durch die geometrischen

Welligkeiten in den Kathoden entsteht und durch die Ablage der Kathoden auf die Niederhalter begünstigt wird. Bei der erneuten Fixierung des Stapels durch die Niederhalter entsteht dadurch eine Tasche, die zu einer Relativbewegung der Kathode führen kann (Weinmann 2022, S. 115). Wie groß die Auswirkung dieses Effekts auf die Stapelgenauigkeit ist, ist allerdings nicht ersichtlich, da eine Quantifizierung nicht erfolgt. Aus diesem Grund wird hierfür im Folgenden ein Versuch vorgestellt, wodurch die Interaktion mit Niederhalter, Greifer und Stapel und die mögliche Verschiebung der Kathode untersucht werden können, s. Kapitel 6.6.1. Im Anschluss werden die Ergebnisse diskutiert und bewertet sowie ein Fazit für die Stapelgenauigkeit in der Einzelblattstapelbildung gezogen (Kapitel 6.6.2).

6.6.1 Experimentelle Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung der Relativbewegung der Kathode im Stapel während der Stapelbildung werden mittels des Versuchsstands Stapel mit jeweils vier Anoden, drei Kathoden und acht Separatoren aufgebaut. Als Separator wird ein keramisch beschichtetes Polyethylenterephthalat (PET)-Gewebe verwendet, der ebenfalls in (Smith & Stüble et al. 2023) verwendet und dort näher beschrieben wird.

Zunächst wird jeweils die initiale Position jeder Kathode bei Ablage auf den Stapel gemessen. Nach Beendigung der Stapelbildung werden die Positionen der drei Kathoden erneut vermessen und mit der initialen Ablageposition verglichen. Die unterste Kathode erfährt hierbei elf Wechselspiele der Greifer-Niederhalter-Interaktion ohne direkten Kontakt mit den Maschinenkomponenten. Die mittlere Lage durchläuft sieben, die oberste drei Wechselspiele. In Abbildung 6-25 findet sich der Ablauf schematisch dargestellt und wird anschließend detailliert beschrieben.



Legende:

Kathode mit 2 Referenzpunkten

Ausrichttisch mit Schieber

Positionierhilfe

Greifer

GOM Atos Core 135
und Messbereich

Stapeltisch mit
Niederhalter & Stapel

Platte mit Fixierungs-
elementen

Keil zum Anheben
des Stapels

Abbildung 6-25: Versuchsablauf zur Untersuchung der Niederhalter-Greifer-Interaktion im Stapel nach (A_Freyd 2022) und (A_Fuchs 2023)

Im Detail können die einzelnen Schritte in Anlehnung an (A_Freyd 2022) und (A_Fuchs 2023) wie folgt beschrieben werden:

1. Greifen einer Stapelkomponente. Die Kathode wird hierbei auf dem Ausrichttisch ausgerichtet und gegriffen, wie es bei den vorherigen Experimenten bereits der Fall war. Ebenfalls werden dort zwei Referenzpunkte, $P_{NGI,1}$ und $P_{NGI,2}$, aufgeklebt, um später deren Position zu vermessen. Da die Abmaße von Separator und Anode größer als die der Kathode sind und die Schiebermechanik dafür nicht ausgelegt ist, werden diese visuell auf dem Ausrichttisch ausgerichtet und ohne Schieber gegriffen. Das ist insofern zulässig, da lediglich die Kathoden später

- vermessen werden und sowohl Anode als auch Separator zur Kathode einen Überhang haben;
2. Nach dem Greifen der Stapelkomponente wird diese auf dem Stapel abgelegt und mit den Niederhaltern fixiert;
 3. Bei Ablage einer Kathode wird nach der Fixierung mit den Niederhaltern mittels GOM ATOS Core 135 ein 3D-Scan des Bereichs mit den Referenzpunkten aufgenommen, bei Separatoren und Anoden wird dieser Schritt übersprungen. Schritt 1-3 werden so oft wiederholt, bis der Stapel aus drei Kathoden, vier Anoden und acht Separatoren vollständig ist;
 4. Der Stapel wird anschließend mit einer Vorrichtung fixiert und die Niederhalter an einer Seite gelöst;
 5. Ein Keil wird an die rechte Seite des Stapels geschoben, um den Referenzpunkt $P_{NGI,1}$ sichtbar zu machen. Zusätzlich werden die Niederhalter in der Schicht wieder montiert, um ab dieser Lage den Stapel zu fixieren und ein vergleichbares Szenario zur ersten Messung zu sichern. Mittels GOM ATOS Core 135 wird dann ein 3D-Scan aufgenommen;
 6. Der gleiche Prozess wird mit Referenzpunkt $P_{NGI,2}$ durchgeführt. Anschließend werden Schritt 5 und 6 so oft wiederholt, bis alle Kathodenblätter und deren Referenzpunkte gescannt wurden.

Für die Auswertung der 3D-Scans wird erneut die GOM Inspect Software 2022 verwendet. Hierzu wird in jedem 3D-Scan das Koordinatensystem wiederholgenau mittels Referenzpunkten auf den ortsfesten Stapeltisch gelegt. Anschließend werden die Koordinaten der Referenzpunkte ermittelt. Durch das gleiche Koordinatensystem kann die euklidische Distanz $d(P_{NGI}, P'_{NGI})$ jedes Punktes zwischen der Ablage und dem Abschluss der Stapelbildung berechnet werden.

Im Gegensatz zu den vorherigen drei Experimenten wird der in Kapitel 6.2.3.2 beschriebene, teilfaktorielle Versuchsplan 2^{5-2} durchgeführt.

6.6.2 Bewertung der Niederhalter-Greifer-Interaktion

Die Auswertung der Messungen wird in Abbildung 6-26 aufgeschlüsselt nach $P_{NGI,1}$ und $P_{NGI,2}$ dargestellt. Das Diagramm zeigt die euklidische Distanz zwischen initialer Ablageposition der Kathode auf dem Stapel und resultierender Position nach Beendigung des Stapelvorgangs. Ein einzelner Datenpunkt umfasst dabei jeweils einen Stapel und

mittelt die euklidischen Distanzen der drei gestapelten Kathoden. Es wurden pro Parameterset drei Replikationen durchgeführt.

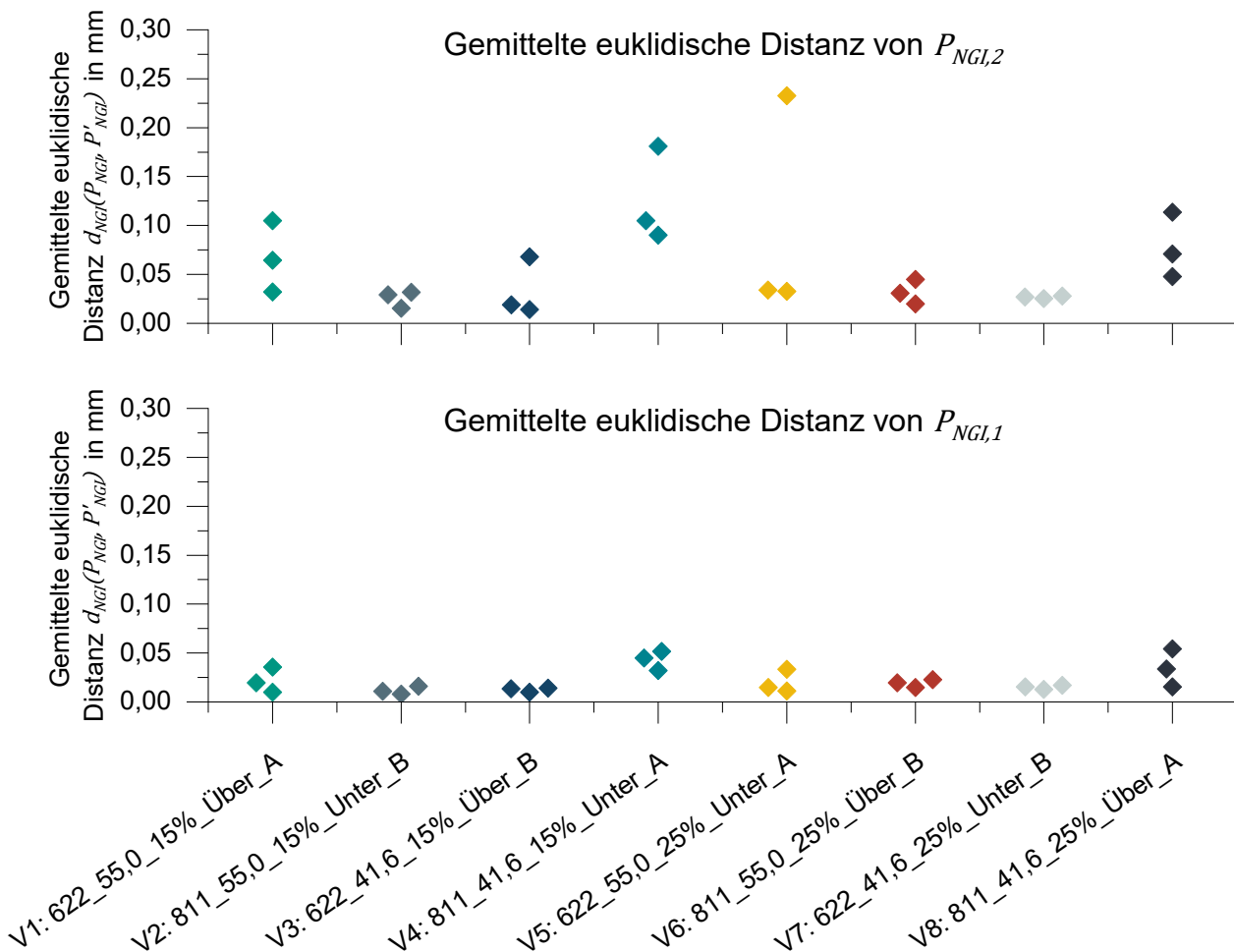
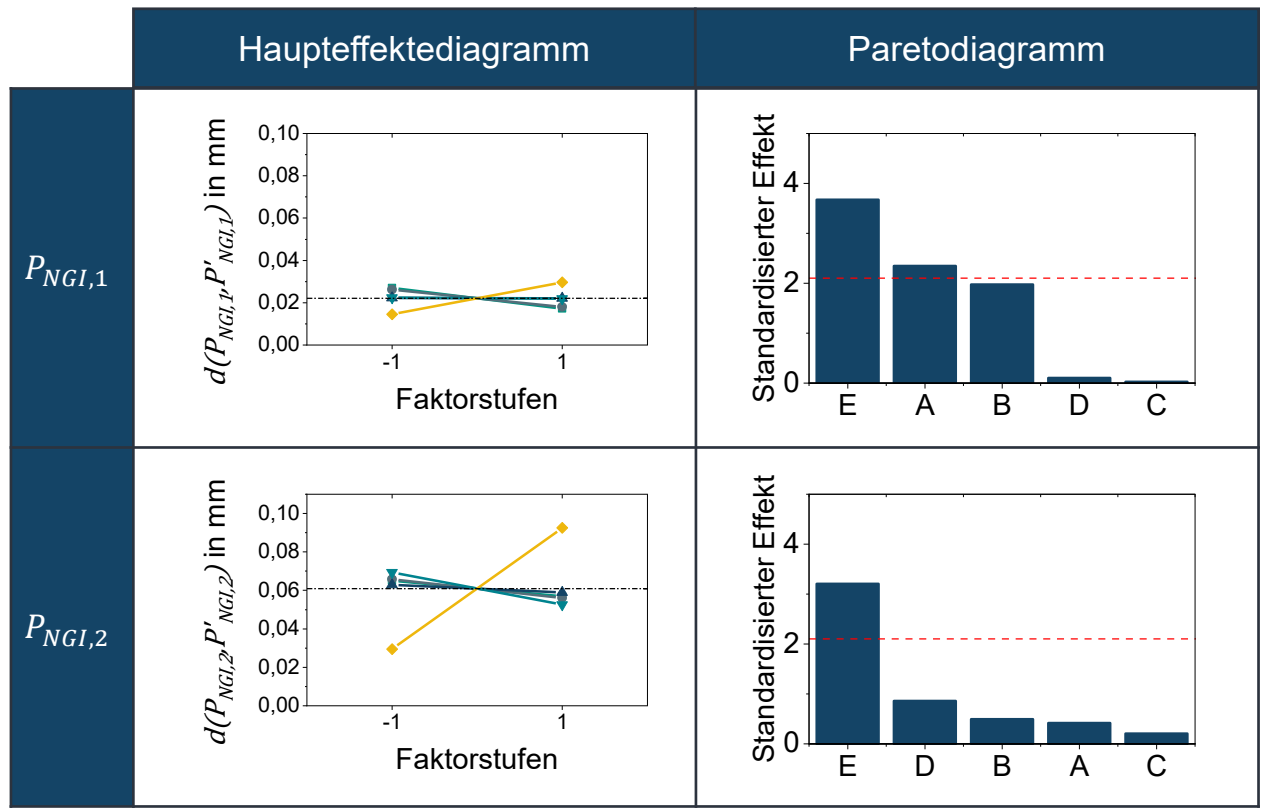


Abbildung 6-26: Gemittelte euklidische Distanz der Punkte $P_{NGI,1}$ (unten) und $P_{NGI,2}$ (oben) zwischen Kathodenablage auf den Stapel und nach Beendigung der Niederhalter-Greifer-Interaktion bzw. des Stapelvorgangs

Auffällig ist hierbei zunächst der Unterschied zwischen den Verschiebungen der beiden Punkte während der Stapelbildung. Während in $P_{NGI,1}$ Verschiebungen zwischen 0,008 mm und 0,05 mm und einem Gesamtmittelwert von 0,022 mm auftreten, sind diese bei $P_{NGI,2}$ zwischen 0,014 und 0,23 mm sowie dem Gesamtmittelwert von 0,061 mm deutlich größer.

Auch die statistische Auswertung, die mit der Software OriginPro 2022 der Firma OriginLab Corporation durchgeführt wurde, bestätigt die Auffälligkeit und gibt gleichzeitig einen Hinweis für die Ursache. Wie in Abbildung 6-27 zu sehen ist, wird bei beiden Punkten die Ablageseite als signifikant identifiziert.



Legende:

- A: Aktivmaterial
- B: Massenbeladung
- ▲ C: Verdichtungsgrad
- ▼ D: Geometrische Abmaße
- ◆ E: Ablageseite

--- Mittelwert
 - - - Signifikanzgrenze

Abbildung 6-27: Haupteffektdiagramme (links) und Paretdiagramm der standardisierten Effekte (rechts) für die euklidische Distanz der Punkte $P_{NGI,1}$ und $P_{NGI,2}$

Insbesondere für $P_{NGI,2}$ ist dies nachvollziehbar, da im Bereich des Übergangs von Substrat und Beschichtung Eigenspannungen und Welligkeiten aufgrund der Prozessierung vorliegen, die bei der Niederhalter-Greifer-Interaktion einen Einfluss haben. Gleichzeitig müssen die Messwerte allerdings weiter differenziert werden.

Nach der Montage der Fixierungsplatte und dem zur Einführung des Keils notwendigen Lösen der Niederhalter fächert der Stapel deutlich auf, s. Abbildung 6-28 links. Diese Auffächerung bewirkt bei der erneuten händischen Fixierung mit den Niederhaltern die Verschiebung, die sich in den Messungen widerspiegelt, s. Abbildung 6-28 rechts.



Abbildung 6-28: Auffächern des Stapels ohne Niederhalter und ohne Keil (links) und Fixierung der Lage mittels Niederhalter und eingeschobenen Keil während der Messaufnahme (rechts)

Werden lediglich die Messungen von $P_{NGI,1}$ und $P_{NGI,2}$ miteinander verglichen, bei denen das Ableiterföhnchen auf der anderen Seite der Messstelle (Faktorstufe -1) liegt, so wird deutlich, dass die Verschiebungen bei $P_{NGI,1}$ mit 0,015 mm und $P_{NGI,2}$ mit 0,029 mm im Hinblick auf die Messgenauigkeit des Messsystems von $\pm 0,0045$ mm sowie auf die zu erzielende Stapelgenauigkeit von $\pm 0,1$ bis $\pm 0,5$ mm als sehr gering einzustufen sind.

Darüber hinaus ist zu vermuten, dass der Effekt durch eine andere Positionierung der Niederhalter sowie des Greifers vermieden oder zumindest verringert werden kann, indem beispielsweise der Ableiter bereichsweise ständig entweder durch einen Niederhalter oder den Greifer fixiert wird. Eine Prozessoptimierung steht allerdings nicht im Fokus der Arbeit, weswegen in diesem Kontext von weiteren Untersuchungen abgesehen wird.

Ein weiterer Aspekt besteht in der Frage, ob die Stapellage einen Einfluss auf die Verschiebungen hat und ob beispielsweise eine Drift zu erkennen ist. Hierzu wurden die Messungen in Abbildung 6-29 der jeweiligen Lage zugeordnet und dargestellt. Es zeigt sich, dass der bereits diskutierte Unterschied zwischen $P_{NGI,1}$ und $P_{NGI,2}$ zu sehen ist. Eine Auswirkung der unterschiedlichen Stapellagen und der damit einhergehenden, unterschiedlichen Anzahl der Niederhalter-Greifer-Interaktionen ist allerdings nicht zu beobachten. Eine Drift oder eine Verstärkung der Verschiebung bei Zunahme der Niederhalter-Greifer-Interaktion ist somit nicht festzustellen. Vielmehr kann daraus geschlossen werden, dass die Verschiebungen zufällig auftreten und sich auch der optimalen Position wieder annähern können.

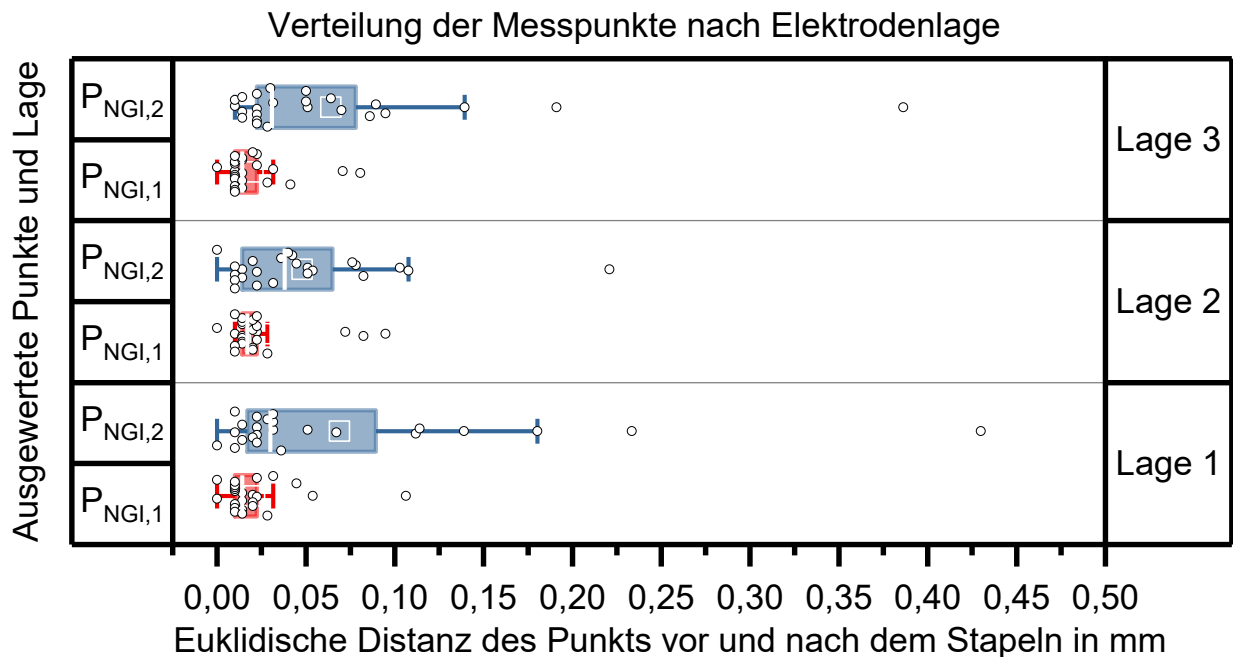


Abbildung 6-29: Darstellung der euklidischen Distanz der Punkte $P_{NGI,1}$ und $P_{NGI,2}$ aufgeteilt nach der jeweiligen Lage im Stapel

Fazit Kapitel 6:

Auf Basis der Untersuchung der vier Prozessabschnitte der Einzelblattstapelbildung lassen sich die Auswirkungen dieser auf den Gesamtprozess abschätzen. So lässt sich beim Ausricht- und Greifprozess sowie beim Ablageprozess beobachten, dass die Abmaße der Kathoden den größten Einfluss auf die Ablageposition auf den Stapel ausüben. Die Strukturparameter Aktivmaterial, Massenbelastung, Verdichtungsgrad sowie Ablageseite haben hingegen keinen wesentlichen Einfluss. Im Hinblick auf die Stapelgenauigkeit lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse aus den vier untersuchten Prozessabschnitte wie folgt zusammenfassen:

- Der **Ausricht- und Greifprozess** ist der wesentliche Prozessabschnitt zur Ausbildung der Stapelgenauigkeit. Direkt nach dem Prozessabschnitt kann jedoch keine belastbare Messung der Eckpunkte durchgeführt werden, da sich die Kathodenränder nach der Fixierung durch den Greifer aufwölben, was zu einer durchschnittlichen Messabweichung von bis zu 0,7 mm führen kann.
- Nach dem **Ablageprozess** kann aufgrund der flächigen Fixierung durch die Niederhalter eine belastbare Messung der Ablageposition auf den Stapel erfolgen, wobei sich die Ablage selber nicht auf die Stapelgenauigkeit auswirkt.
- Der Einfluss des **Handhabungsprozesses** sowie der **Niederhalter-Greifer-Interaktion** auf die Stapelgenauigkeit kann vernachlässigt werden.
- Aus den untersuchten Einflussfaktoren haben die **geometrischen Abmaße der Kathodenblätter** einen signifikanten Einfluss auf die Stapelgenauigkeit.

Die weiteren Einflussfaktoren Verdichtungsgrad, Ablageseite, Aktivmaterial und Massenbeladung zeigen sich größtenteils nicht als signifikante Parameter.

- Bei **Nennmaß** der Kathodenblätter ergeben sich durchschnittliche prozesseitige Streuungen von bis zu $\pm 0,13$ mm, die sich hauptsächlich auf die Qualität der Schnittkante sowie fertigungsbedingt leicht schwankende Kathodenblattabmaße innerhalb einer Faktorstufe zurückführen lassen.
- Die **Qualität der Schnittkante** hat einen wesentlichen Einfluss auf die Stapelgenauigkeit. Messungen zeigen, dass die Kathodeneckpunkte feingestanzter Kathodenblätter etwa um 40 % weniger streuen als Kathodenblätter, die mittels Bandstahlschnitt vereinzelt wurden.
- Sowohl **Untermaß** als auch **Übermaß** führen im Durchschnitt zu einer etwa doppelt so großen Streuung der Kathodeneckpunkte im Vergleich zum Nennmaß. Zurückzuführen ist dies beim Untermaß auf das Gleiten des Kathodenblatts aufgrund des fehlenden Kontakts zum gegenüberliegenden Schieber. Beim Übermaß lässt sich der Effekt durch das Einklemmen und Aufwölben des Kathodenblatts zwischen den Schiebern und der dadurch ungenaueren Aufnahme durch den Greifer erklären.

Durch die dargestellten experimentellen Untersuchungen kann somit die Forschungsfrage nach dem Einfluss der Geometrie der Kathodenblätter auf die Stapelgenauigkeit bei der Einzelblattstapelbildung grundsätzlich aufgeklärt werden. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Kathodenabmaße einen wesentlichen Einfluss haben. Vertiefende Untersuchungen zu weiteren Fragestellungen des Kathodenabmaßeinflusses, wie nicht parallele oder leicht verrundete Kanten der Kathodenblätter, lässt der experimentelle Aufwand nur sehr eingeschränkt zu. Hierzu bietet sich ein Simulationsmodell an, das im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

7 Modellierung der Stapelgenauigkeit für das Einzelblattstapeln

In Kapitel 7 wird ein Modellierungsansatz für die Stapelgenauigkeit auf Basis des experimentell untersuchten Einzelblattstapelns entwickelt, s. Abbildung 7-1.

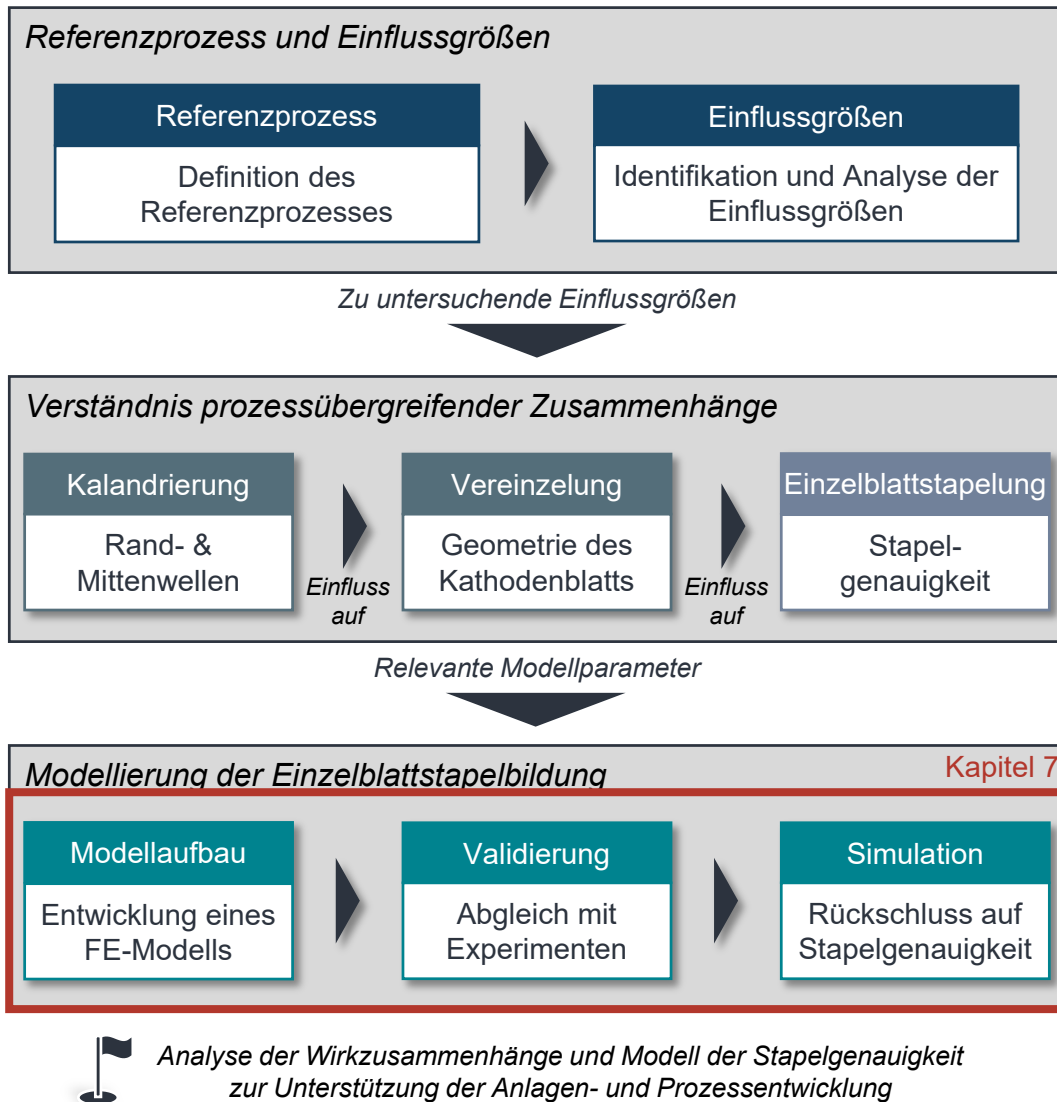


Abbildung 7-1: Einordnung von Kapitel 7 in das Zielbild der Arbeit

Ziel des Modells ist es, auf Basis des Einzelblattes eine Aussage über die zu erwartende Stapelgenauigkeit treffen zu können. Zunächst wird in Kapitel 7.1 der Modellierungsansatz für eine FE-Simulation vorgestellt, der in Kapitel 7.2 anhand der in Kapitel 6 erzielten experimentellen Ergebnisse validiert wird. Abschließend folgt in Kapitel 7.3 die exemplarische Anwendung des Modells mittels der simulativen Untersuchung des Cambereinflusses auf die Stapelgenauigkeit. Die Ergebnisse von Kapitel 7 basieren in

Teilen auf den angeleiteten Abschlussarbeiten (A_Maier 2022), (A_Fuchs 2023), (A_Schwab 2022) und (A_Wang 2021) sowie den Veröffentlichungen (Mayer & Fleischer 2021; Mayer & Maier et al. 2023) des Autors der vorliegenden Dissertation.

7.1 Modellierungsansatz der Stapelbildung für großformatige Elektroden

Die Untersuchungen in Kapitel 6 zeigen, dass der maßgebliche Einfluss auf die resultierende Stapelgenauigkeit auf die Abmaße des Kathodenblatts zurückgeführt werden kann. Die weiteren Einflussfaktoren der Kathoden spielen eine untergeordnete Rolle. Prozessseitig lässt sich feststellen, dass die Interaktion zwischen Niederhalter, Greifer und abgelegtem Kathodenblatt sowie der Handhabungsprozess keinen wesentlichen Einfluss auf die Stapelgenauigkeit haben. Es wird deutlich, dass der Ausrichtprozess mit dem anschließenden Greifen für die Stapelgenauigkeit entscheidend ist. Ebenso ist es notwendig, die Fixierung des Kathodenblatts mittels der Niederhalter zu betrachten, sodass dessen Ecken flächig fixiert sind, wie es nach dem Ablageprozess der Fall ist. Auf Basis dieser Erkenntnis wird zunächst ein FE-Modell entwickelt, mithilfe dessen der Ausricht-, Greif- und Ablageprozess für unterschiedliche Einzelblattgeometrien simuliert werden kann, s. Kapitel 7.1.1. Zur Bewertung der Stapelgenauigkeit werden die Eckpunkte der Elektrode auf dem Stapeltisch verwendet, ähnlich dem Vorgehen in (Kollenda & Hussein et al. 2023). Anschließend wird ein Verfahren für die Modellierung des Kathodenmaterials entwickelt und verifiziert, s. Kapitel 7.1.2.

7.1.1 Aufbau eines FE-Simulationsmodells für die Stapelgenauigkeit

Entsprechend dem definierten Referenzprozess für die Einzelblattstapelbildung sowie der späteren Validierung wird das FE-Modell mit den Abmaßen des entwickelten Versuchsstands entwickelt. Der grundsätzliche Modellaufbau findet sich in Abbildung 7-2 und wird in dem Simulationsprogramm Abaqus 2022 der Firma Dassault Systèmes aufgebaut.

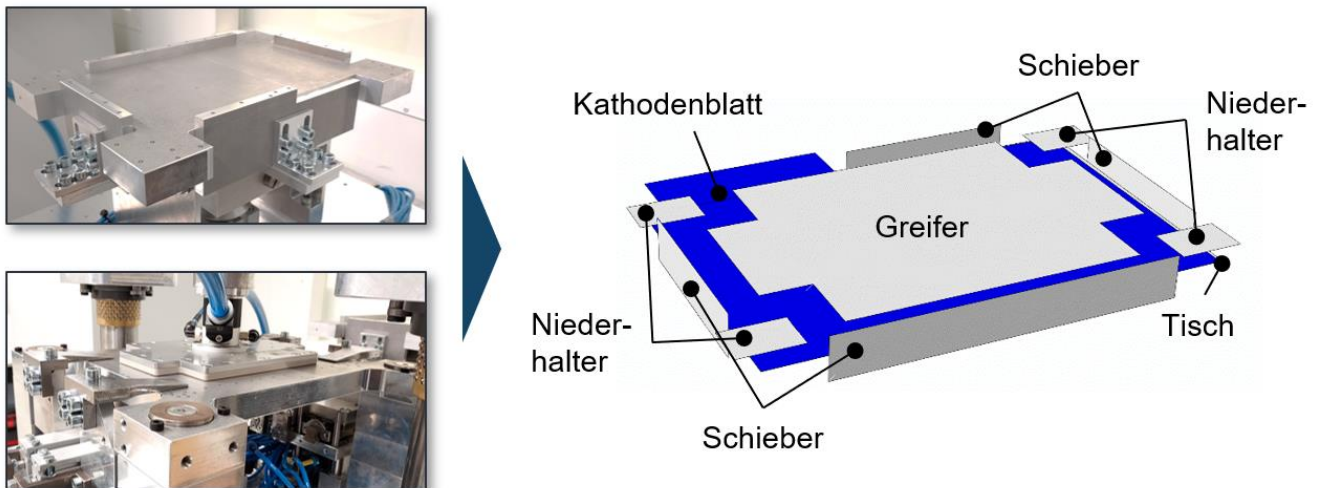


Abbildung 7-2: Aufbau des Modells in Abaqus 2022 basierend auf dem aufgebauten Versuchsstand in Anlehnung an (Mayer & Maier et al. 2023)

Da der Handhabungsprozess keinen nennenswerten Einfluss auf die Positionierung des Kathodenblattes hat, werden zur Abbildung der drei Prozesse Ausrichten, Greifen und Ablage auf dem Stapel die beiden Tische des Prüfstands in einem zusammengefasst. So besteht das Simulationsmodell aus einem Tisch, auf dem die Kathode initial abgelegt und durch vier Schieber ausgerichtet wird. Der Tisch ist dabei in allen translatorischen sowie rotatorischen Freiheitsgraden fixiert, während sich die Schieber jeweils translatorisch zu den Kanten des Tisches bewegen können. Alle weiteren Freiheitsgrade der Schieber sind ebenso fixiert. Zuzüglich sind der Greifer sowie die vier Niederhalter dem realen Versuchsaufbau entsprechend in das Modell integriert. Je nach Lage des Kathodenblatts fixiert jeder Niederhalter eine Fläche von 20 mm x 20 mm an den jeweiligen Ecken. Für den Greifer sowie für die Niederhalter wird eine translatorische, vertikal zum Tisch ausgerichtete Bewegung ermöglicht. Bei den Niederhaltern wird zudem ein translatorischer Freiheitsgrad parallel zum Tisch zugelassen.

Aufgrund der relativ großen Steifigkeitsunterschiede werden Tisch, Schieber, Niederhalter und Greifer als flächige Starrkörper und lediglich die Kathode als deformierbarer Körper modelliert. Die Kathode wird aus drei Schichten, also Beschichtung-Aluminium-Beschichtung, modelliert, die jeweils mittels S4R-Elementen vernetzt und über Tie Constraints fest miteinander verbunden sind. Auf die konkrete Modellierung wird gesondert in Kapitel 7.1.2 eingegangen.

Für die Kontaktmodellierung wird der in Abaqus implementierte General Contact Algorithmus verwendet. Der Grund für die Auswahl liegt in dessen Robustheit und dem zu

erwartenden orthogonalen Auftreffen der Kathodenblattkante auf die Schieberoberfläche. In tangentialer Richtung wird das bestehende Coulomb'sche Reibmodell in Abaqus verwendet, in normaler Richtung wird ein harter Kontakt modelliert.

Der Ablauf der Simulation gliedert sich in die folgenden Schritte:

- Schritt 1: Es wirkt die Gravitationskraft, sodass zwischen Tisch und Kathodenblatt, das initial minimal über dem Tisch modelliert ist, flächiger Kontakt hergestellt wird;
- Schritt 2: Anschließend verfahren die Schieber an die Tischkanten und positionieren dabei das Kathodenblatt. Den Schiebern wird dabei eine konstante Geschwindigkeit von 35 mm/s aufgeprägt;
- Schritt 3: Alle Maschinenteile (Starrkörper) sind fest fixiert. Die in Schritt 2 aufgeprägte Bewegung des Kathodenblatts klingt aufgrund der Reibung ab und das Kathodenblatt positioniert sich;
- Schritt 4: Nach der Positionierung des Kathodenblatts wird der Greifer kraftgesteuert mit 220 N abgesenkt und fixiert die Kathode auf dem Tisch;
- Schritt 5: Anschließend werden die Schieber weggesteuert vom Tisch weg bewegt. Der Greifer hält seine Position und fixiert das Kathodenblatt weiterhin;
- Schritt 6: Es folgt eine kraftgesteuerte Bewegung von 120 N pro Niederhalter, mit der sich diese auf das Kathodenblatt absenken;
- Schritt 7: Im letzten Schritt wird der Greifer vertikal nach oben bewegt und der Kontakt löst sich. Die Niederhalter fixieren das Kathodenblatt weiterhin.

Sowohl die Schiebergeschwindigkeit als auch die implementierten Kräfte wurden anhand des Versuchsstands ermittelt. Zur Berechnung der Simulation wird der Solver Abaqus/Explicit verwendet. Nach der Berechnung werden die Positionen der vier Eckpunkte ausgewertet.

7.1.2 Modellierung des Kathodenmaterialverhaltens

Das Ziel der Modellierung des Kathodenmaterialverhaltens ist es, einen Ansatz zu entwickeln, der das Verhalten großformatiger Kathodenblätter, insbesondere auch hinsichtlich des zu erwartenden Biegeverhaltens, mit vertretbarem Rechenaufwand hinreichend genau abbildet. Wie in Kapitel 2.3.1.1 beschrieben, sind aus der Literatur einige Ansätze bekannt, die jedoch nicht oder nur eingeschränkt auf das vorliegende Problem anwendbar sind.

Eine Herausforderung liegt in der Abbildung großformatiger Kathodenblätter mit Abmaßen im Bereich von 208 mm x 135 mm, sodass aufgrund der zu erwartenden Rechendauer einige Modellierungsarten, wie Materialmodellierungen auf Partikelebene, ausscheiden. Auch das in der Literatur häufig verwendete Materialmodell Crushable Foam kann zwar für großformatige Kathodenblätter eingesetzt werden, allerdings steigt auch hier die zu erwartende Rechendauer aufgrund der zu verwendenden Volumenelemente und den Abmaßen des Kathodenblatts massiv an. Darüber hinaus erfordert die Implementierung des Materialmodells in Abaqus eine teilweise aufwändige Ermittlung verschiedener Materialparameter und bildet mit dem schaumartigen Kompressionsverhalten Effekte ab, die für die vorliegende Problemstellung nicht relevant sind. Aus diesen Gründen wird sich gegen dieses Materialmodell entschieden.

(Aydemir 2021, 72 ff.) zeigt mit der Verwendung von Schalenelementen und einem isotrop elastisch-plastischen Materialmodell einen vielversprechenden Ansatz, wobei die Kathode jedoch als homogener Verbund betrachtet wird. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus der Kathode ist zu erwarten, dass sich Zug- und Biegeeigenschaften deutlich voneinander unterscheiden und daher auch die Ermittlung der Materialparameter durch Zugversuche nicht ausreichend ist, da insbesondere bei den Kathodenblättern mit Übermaß Biegespannungen zu erwarten sind. Einige Annahmen des Ansatzes können jedoch auch für das vorliegende Problem übernommen werden.

So zeigt (Aydemir 2021, S. 76–78), dass für die Kathode ein richtungs- und dehnratenunabhängiges Verhalten angenommen werden kann. Ebenso kann für die Modellierung des Kathodenverhaltens ein isotropes Verhalten zugrunde gelegt werden (Aydemir 2021, S. 83). Zur Differenzierung des Biege- und Zugverhaltens wird im Gegensatz zu (Aydemir 2021) die Kathode nicht homogenisiert, sondern aus drei Schichten modelliert. Jede der drei Schichten (Beschichtung-Substrat-Beschichtung) soll mittels S4R-Elementen in Abaqus diskretisiert und mit der jeweiligen Nachbarschicht über Tie Constraints fest verbunden werden. Aufbauend auf den Erkenntnissen von (Aydemir 2021, S. 74–87) werden die drei Schichten jeweils als isotrope elastisch-plastische Materialien modelliert. Somit sind der E-Modul E , die Querkontraktionszahl ν sowie die Fließkurven σ_f der Aluminiumfolie und der Beschichtung zu bestimmen. Auf die Implementierung eines Versagensmodells wird verzichtet, da ein Versagen der Bauteile für den vorliegenden Fall nicht im Fokus steht.

Insbesondere die Ermittlung der Parameter für die Beschichtung sind allerdings aufgrund der festen Verbindung mit dem Substrat herausfordernd. In der Literatur existieren zwar Ansätze zur mechanischen Charakterisierung, allerdings ist häufig der Aufwand hoch oder es werden spezielle, oftmals nicht vorhandene Prüfmaschinen benötigt, wie Nanoindentationsversuche, s. beispielsweise (Sangrós Giménez & Finke et al. 2018), oder das Gießen von Zugproben aus dem jeweiligen Beschichtungsmaterial, s. (Weinmann 2022, S. 84–89; Yim & Choi et al. 2014). Darüber hinaus schlägt (Gupta & Üçel et al. 2020) zwar eine Vorgehensweise zur mechanischen Charakterisierung der Beschichtung vor, allerdings wird sich bei dem Ansatz auf das elastische Verhalten fokussiert und keine Fließkurve abgeleitet. Auch wird eine einseitig beschichtete Elektrode verwendet, wie sie im industriellen Maßstab nicht häufig vorliegt. Zur Modellierung des Kathodenmaterialverhaltens und der Bestimmung der entsprechenden Parameter wird daher der in Abbildung 7-3 dargestellte methodische Ansatz vorgeschlagen.

1. Experimentelle Ermittlung

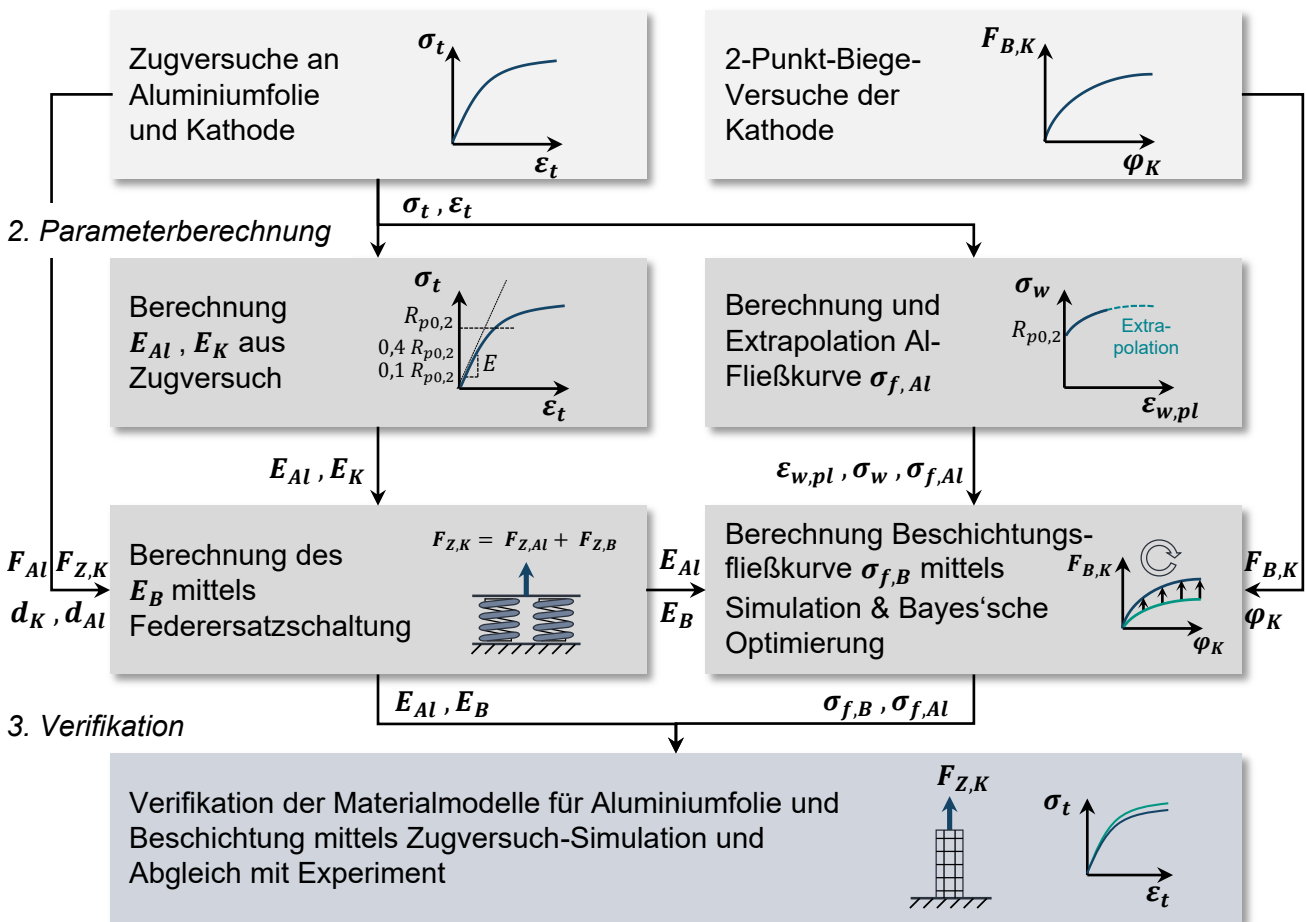


Abbildung 7-3: Methode zur Ableitung der Parameter des Materialmodells in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Experimentell werden zunächst Zugversuche an der beidseitig beschichteten Kathode sowie am unbeschichteten Substrat durchgeführt, um die zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme zu berechnen. Zudem werden 2-Punkt-Biegeversuche an der beschichteten Kathode durchgeführt, um den Biegekraft-Winkel-Verlauf zu ermitteln. Anhand der Spannungs-Dehnungs-Diagramme können zum einen der E-Modul des Substrats E_{Al} sowie zum anderen der E-Modul des Gesamtverbunds E_K ermittelt werden. Mittels der Analogie einer Parallelfederschaltung kann daraus der fehlende E-Modul E_B berechnet werden. Hinsichtlich der Querkontraktionszahl für die Beschichtung und des Substrats gibt es in der Literatur bereits zahlreiche Angaben, s. beispielsweise (Cheng & Hong et al. 2017; Sahraei & Bosco et al. 2016; Woodcox & Shepard et al. 2021), weswegen diese übernommen werden und nicht eigenständig ermittelt werden müssen.

Parallel dazu kann aus der Spannungs-Dehnungs-Kurve des Substrats dessen Dehngrenze $R_{p0,2}$ sowie dessen Fließkurve $\sigma_{f,Al}$ approximiert und extrapoliert werden. Mithilfe der bereits ermittelten Parameter wird nun die Fließkurve der Beschichtung $\sigma_{f,B}$ berechnet. Hierzu wird ein Simulationsmodell des 2-Punkt-Biegeversuchs in Abaqus aufgebaut. Die Kathodenprobe wird, entsprechend des Modells für die Stapelgenauigkeit, als dreischichtiger Aufbau modelliert. Die Parameter für das Substrat ($E_{Al}, \nu_{Al}, \sigma_{f,Al}$) sowie für die Beschichtung (E_B, ν_B) werden gemeinsam mit einer initialen Annahme für die Fließkurve $\sigma_{f,B}$ in das Simulationsmodell implementiert. Anschließend wird die Biegekraft-Winkel-Kurve aus der Simulation extrahiert und mit dem experimentell ermittelten Verlauf verglichen. Darauf basierend kann ein Minimierungsproblem abgeleitet werden, das mithilfe der Bayes'schen Optimierungsmethode gelöst wird. Unter Nutzung des Optimierers werden neue Parameter für die Fließkurve $\sigma_{f,B}$ ermittelt und so lange iteriert, bis diese hinreichend genau ist. Zur Verifikation der extrahierten sowie berechneten Materialmodellparameter wird abschließend ein Zugversuch ebenfalls in Abaqus simuliert und mit der experimentell ermittelten Zugkurve verglichen.

In den folgenden Kapiteln wird die Methode im Detail vorgestellt und anhand der Materialkonfiguration NMC811, 41,6 mg cm⁻² Massenbeladung und 15 % Verdichtungsgrad exemplarisch angewendet und verifiziert.

7.1.2.1 Experimentelle Ermittlung der Zug- und Biegekurven

Die hier aufgeführten Experimente wurden im Rahmen der Abschlussarbeit (A_Schwab 2022) durchgeführt. Für die Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms des Substrats sowie der gesamten Kathode wird eine Zugprüfmaschine des Typs 2.5kN zwicki RetroLine der ZwickRoell GmbH & Co. KG sowie ein Kraftsensor des Typs Xforce P, Nennkraft 1 kN verwendet.

Da es für den Zugversuch mit Batterieelektroden keine eigene Norm gibt, wird sich für die Auslegung der Probengeometrie und der Parametereinstellungen an die DIN 50154 „Zugversuch an Folien und Bändern aus Aluminium und Aluminium-Knetlegierungen mit einer Nenndicke kleiner 0,200 mm“ und die DIN EN ISO 527-1 „Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze“ angelehnt. Entsprechend werden streifenförmige Proben mit einer Länge von 135 mm und einer Breite von 15 mm aus dem beschichteten Teil der Kathode sowie aus dem unbeschichteten Substratbereich in Laufrichtung geschnitten. Für die Versuchsreihe werden jeweils sieben Proben verarbeitet, die über Nacht mindestens 16 h bei einer Raumtemperatur von 23 °C vorkonditioniert wurden. Die Proben werden mit einer Einspannlänge von 80 mm und einer Vorspannung von 1 N eingespannt, als Traversengeschwindigkeit wird 1 mm s⁻¹ festgelegt. Die Berechnung der technischen Spannung σ_T erfolgt dabei aus der gemessenen Zugkraft $F_{Z,K}$ bzw. $F_{Z,Al}$ sowie der Querschnittsfläche der Kathode A_K bzw. des Substrats A_{Al} , s. Formel 7-1 am Beispiel der Kathode. (A_Schwab 2022; DIN EN ISO 527-1; DIN 50154)

$$\sigma_T = \frac{F_{Z,K}}{A_K} \quad \text{Formel 7-1}$$

Die technische Dehnung ε_T wird dabei indirekt über den Traversenweg der Zugprüfmaschine Δl und der Einspannlänge l_0 mit Formel 7-2 ermittelt.

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Formel 7-2}$$

In Abbildung 7-4 finden sich die ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagramme des Substrats sowie der Kathode, die jeweils auf 7 Versuchen basieren. Die Messungen werden jeweils gemittelt, sodass eine Kurve zur weiteren Verwendung abgeleitet werden kann.

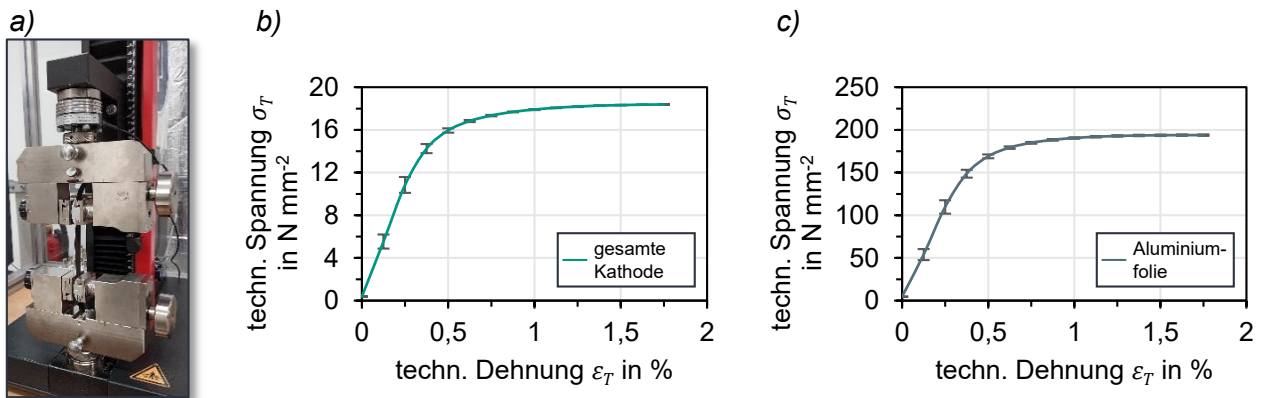


Abbildung 7-4: Versuchsaufbau der Zugprüfung in a) mit den Spannungs-Dehnungsdiagrammen für die gesamte Kathode in b) und die Aluminiumfolie in c) in Anlehnung an (A_Schwab 2022)

Unter Berücksichtigung der Querschnittsveränderung lassen sich nach (Bürgel & Richard et al. 2014, S. 3) aus σ_T und ε_T die wahre Dehnung ε_W und die wahre Spannung σ_W berechnen, s. Formel 7-3 und Formel 7-4.

$$\varepsilon_W = \ln(1 + \varepsilon_T) \quad \text{Formel 7-3}$$

$$\sigma_W = \sigma_T \cdot (1 + \varepsilon_T) \quad \text{Formel 7-4}$$

Für die 2-Punkt-Biegeprüfung wird ebenfalls die Zugprüfmaschine 2.5kN zwicki Retro-Line verwendet. Anstelle der Einspannbacken für die Zugprüfung wird jedoch eine Vorrichtung der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG verwendet, die eine Kathodenprobe fest einspannt und diese durch eine drückende Traversenbewegung $v_{Traverse}$ über ein Getriebe in eine definierte Rotation versetzt. Durch die Rotation wird die Probe gegen einen Kraftsensor gedrückt, der die Biegekraft aufzeichnet, sodass ein Kraft-Winkel-Zusammenhang $F_{B,K}^{Exp}(\varphi_{B,K})$ abgeleitet werden kann. Als Sensor ist ein Xforce P Kraftaufnehmer mit der Nennkraft 10 N integriert. In Abbildung 7-5 a) ist der Messaufbau schematisch dargestellt.

Wie bei der Zugprüfung gibt es auch für den 2-Punkt-Biegeversuch keine Norm für die Prüfung von Elektroden, weswegen sich an den beiden Normen DIN EN ISO 7438 „Metallische Werkstoffe – Biegeversuch“ und DIN 53121 „Prüfung von Papier, Karton und Pappe“ orientiert wird. Es werden in Laufrichtung vereinzelte, streifenförmige Proben des beschichteten Kathodenbereichs mit einer Breite von 15 mm verwendet, wobei der Rotationspunkt der Probe 5 mm vom Kraftsensor entfernt ist. Für die Versuchsreihe werden sieben Proben verarbeitet, die ebenso über Nacht mindestens 16 h bei einer

Raumtemperatur von 23 °C vorkonditioniert wurden. Die Rotation der Probe wird auf 90 ° festgelegt. Als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Messdauer wird eine Rotationsgeschwindigkeit von $\omega_{B,K} = 1 \text{ Grad s}^{-1}$ gewählt, was für typische Prüfungen von Papier, Pappe und Karton zwar sehr hoch ist, allerdings im Hinblick auf den Stapelprozess als ausreichend genau erachtet wird. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-5 b) abgebildet. Die sieben Biegekurven wurden dabei gemittelt, sodass das Ergebnis für den späteren Abgleich mit der Simulation verwendet werden kann. (A_Schwab 2022; DIN EN ISO 7438; DIN 53121)

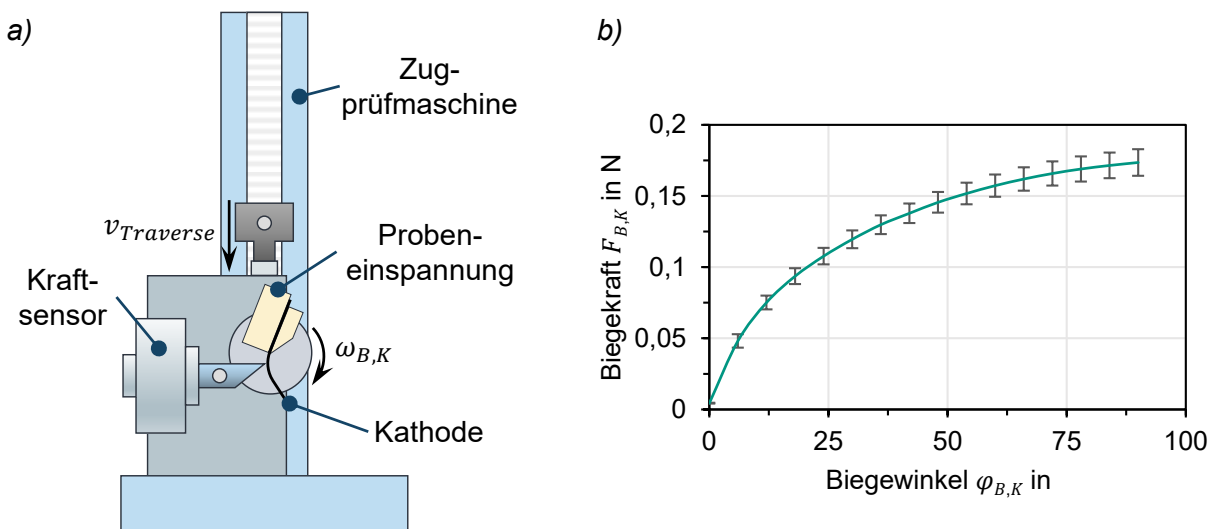


Abbildung 7-5: Versuchsaufbau des 2-Punkt-Biegeversuchs in a) und die Messergebnisse in b) in Anlehnung an (A_Schwab 2022)

7.1.2.2 Parametrierung

Zur Berechnung der notwendigen Parameter werden zunächst die E-Module der Kathode E_K und des Substrats E_{AL} , sowie die Dehngrenze $R_{p0,2}$ aus den Experimenten berechnet. Die Auswertung erfolgt auf Basis der DIN EN ISO 6892-1 Anhang G „Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“. Da die Dehngrenze $R_{p0,2}$ aufgrund des fließenden Übergangs von elastischer zu plastischer Verformung nicht eindeutig erkennbar ist, wird eine Regressionsgerade bei 10 % und 40 % einer initialen Schätzung von $R_{p0,2}$ in die Messdaten gelegt und mithilfe des so ermittelten E-Moduls ein neuer $R_{p0,2}$ -Wert berechnet. Es wird solange iteriert, bis die Konvergenz erreicht ist. (DIN EN ISO 6892-1; Wirth & Vitzthum et al. 2023)

Die ermittelten Werte werden anschließend gemittelt, sodass sich für das Substrat $E_{Al} = 45,67 \text{ GPa}$ und für die Kathode $E_K = 4,65 \text{ GPa}$ ergibt.

Zur Berechnung des fehlenden E-Moduls der Beschichtung E_B kann nach (Sahraei & Bosco et al. 2016) zunächst analog zu einer Federparallelschaltung die Gesamtzugkraft an der Kathode $F_{Z,K}$ auf die Beschichtung und das Substrat aufgeteilt werden, s. Formel 7-5.

$$F_{Z,K} = F_{Z,B} + F_{Z,Al} \quad \text{Formel 7-5}$$

Im Gegensatz zu (Zhang & Xu et al. 2017) wird auf einen Faktor zur Gewichtung des Krafteinflusses der Beschichtung und des Substrats verzichtet und stattdessen die Querschnittsflächen zur Gewichtung verwendet. Unter Annahme des Hooke'schen Gesetzes, s. (Bürgel & Richard et al. 2014, S. 10), sowie nach (Sahraei & Bosco et al. 2016) einer gleichbleibenden Dehnung der Beschichtung und des Substrats kann der Zusammenhang in Formel 7-6 abgeleitet werden, wobei A_K , A_B und A_{Al} die jeweiligen Querschnittsflächen sind.

$$E_K \cdot A_K = E_B \cdot A_B + E_{Al} \cdot A_{Al} \quad \text{Formel 7-6}$$

Die Querschnittsflächen lassen sich aus den bekannten Abmaßen der Kathodenprobe sowie unter der Annahme, dass sich nach (Zhang & Huang et al. 2022) die Dicke des Substrats d_{Al} durch die Kalandrierung im Mittel nicht ändert, berechnen, sodass sich für $E_B = 759,87 \text{ MPa}$ ergibt.

Als weiteren Schritt wird die Fließkurve des Substrats $\sigma_{f,Al}$ aus den Experimenten abgeleitet, um das Verfestigungsverhalten abbilden zu können. Hierzu existiert eine Vielzahl analytischer Modelle, wobei Vorversuche zeigen, dass sich das Modell nach Voce für die Fließkurve $\sigma_{f,Al}$ gut eignet, s. Formel 7-7 in Anlehnung an (Sandström 2024, S. 40).

$$\sigma_f^{Voce}(\varepsilon_W) = C_1 - C_2 \cdot e^{-C_3 \cdot \varepsilon_W} \quad \text{Formel 7-7}$$

Die Parameter C_{1-3} werden mittels der Python-Bibliothek SciPy (The SciPy community 2024)¹⁴ in die experimentellen Daten gefittet, sodass sich für $C_{1,Al} = 197,63 \text{ MPa}$,

¹⁴ The SciPy community (2024), SciPy. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/index.html> [22.02.2024].

$C_{2,Al} = 19,78 \text{ MPa}$ und $C_{3,Al} = 324,64$ ergeben, woraus Abbildung 7-6 abgeleitet werden kann. Die Abweichung zwischen berechneten und experimentellen Daten ergibt sich aus der zu hoch berechneten Dehngrenze $R_{p0,2}$ zur Ermittlung des E-Moduls, was aufgrund der geringen Abweichung hier jedoch akzeptiert werden kann.

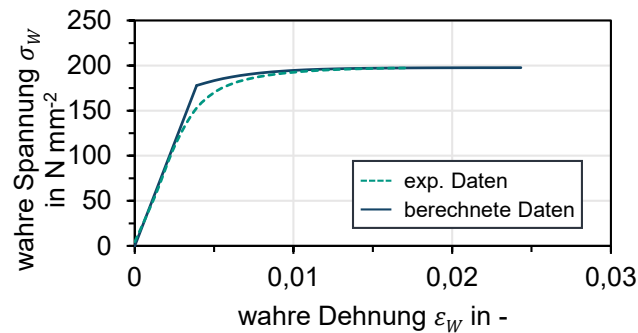


Abbildung 7-6: Vergleich der experimentellen Daten und der berechneten Daten der Aluminiumfolie

Zur finalen Parametrierung des Materialmodells fehlt abschließend die Fließkurve der Beschichtung $\sigma_{f,B}$. Da sowohl die Kathode als auch das Substrat einen ähnlichen Verlauf der Zugversuche vorweisen, wird für $\sigma_{f,B}$ ebenfalls einen Verlauf nach dem Modell von Voce aus Formel 7-7 angenommen.

Es stellt sich die Frage, wie die unbekannt Parameter $C_{1,B}$, $C_{2,B}$ und $C_{3,B}$ ermittelt werden können, um das Verhalten der Kathode hinreichend genau abbilden zu können.

Hierzu werden die experimentellen Daten und ein Simulationsmodell des 2-Punkt-Biegeversuchs verwendet, woraus sich ein Optimierungsproblem formulieren und lösen lässt, s. Abbildung 7-7.

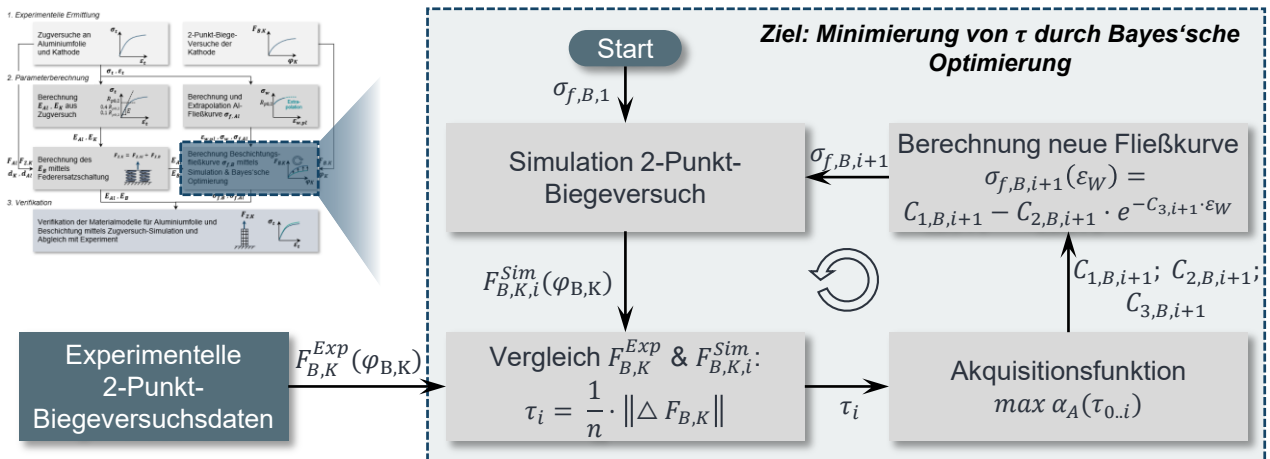


Abbildung 7-7: Vorgehen zur Ermittlung der Beschichtungsfließkurve $\sigma_{f,B}$ nach (A_Fuchs 2023)

Im Folgenden werden die einzelnen Bausteine des Optimierungsablaufs näher beschrieben, der im Rahmen der angeleiteten Abschlussarbeit (A_Fuchs 2023) entwickelt wurde.

Simulation 2-Punkt-Biegeversuch und Vergleich mit experimentellen Daten

Zunächst wird ein Simulationsmodell in Abaqus für den 2-Punkt-Biegeversuch entwickelt, s. Abbildung 7-8. Die Simulation besteht aus den drei Bestandteilen Kathodenprobe, Probeneinspannung und Sensor. Aufgrund der relativ hohen Nachgiebigkeit der Kathodenprobe können die Probeneinspannung und der Sensor als Starrkörper modelliert werden. Die Kathode wird, wie in Kapitel 7.1.1 beschrieben, dreischichtig modelliert. Jede Schicht wird mit 1500 S4R-Elementen diskretisiert. Die Kathodenprobe ist über einen Tie Constraint fest mit der Einspannung verbunden. Alle weiteren Freiheitsgrade der Einspannung sind bis auf die Rotation eingeschränkt. Entsprechend dem Experimentaufbau wird der Einspannung eine Rotation von 90° um die x -Achse in negativer Richtung aufgeprägt, sodass die Kathodenprobe gegen den fest eingespannten, 5 mm entfernten Sensor gedrückt und gebogen wird. Die Kontakte werden mithilfe des Abaqus-eigenen General Contact Algorithmus modelliert. Zur automatisierten Durchführung der Optimierung ist der Modellaufbau mittels der Programmiersprache Python vollautomatisiert umgesetzt. Zur Visualisierung ist das Modell in Abbildung 7-8 dargestellt.

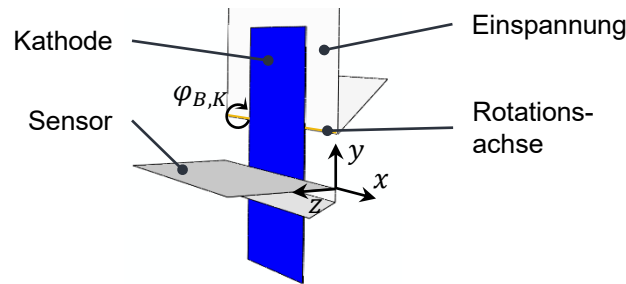


Abbildung 7-8: Modellaufbau der Biegesimulation in Abaqus in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)

Die Simulation wird mittels des Solvers Abaqus/Implicit gelöst. Als Ergebnis der Simulation wird entsprechend des Experimentaufbaus die induzierte Auflagerkraft $F_{B,K}^{Sim}$ im Sensor in z-Richtung über den Rotationswinkel $\varphi_{B,K}$ aufgenommen.

Die Ergebnisse der Simulation werden anschließend mit dem experimentellen Kraft-Winkel-Verlauf $F_{B,K}^{Exp}(\varphi_{B,K})$ verglichen und mittels der skalaren Größe τ_i bewertet, s. Formel 7-8. n ist hierbei die Anzahl der ausgewerteten Stützpunkte von $\Delta F_{B,K}$.

$$\tau_i = \frac{1}{n} \cdot \|\Delta F_{B,K}\| = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^n (F_{B,K,i}^{Sim} - F_{B,K,i}^{Exp})^2} \quad \text{Formel 7-8}$$

Bayes'sche Optimierung & Berechnung neuer Fließkurve

Mit der Bewertung der Simulation im Vergleich zu den experimentellen Daten kann das Optimierungsproblem aufgestellt werden. Das übergeordnete Ziel ist es, die Parameter $C_{1,B}, C_{2,B}, C_{3,B}$ der Beschichtungsfließkurve $\sigma_{f,B}$ so zu wählen, dass $\tau(C_{1,B}, C_{2,B}, C_{3,B})$, also die Bewertung der Simulationsabweichung zu den experimentellen Werten, minimiert wird. In Anlehnung an (Shahriari & Swersky et al. 2016) lässt sich somit das Optimierungsproblem entsprechend Formel 7-9 formulieren.

$$\mathbf{c}^* = \arg \min \tau(\mathbf{c}); \text{ mit } \mathbf{c} = (C_{1,B}, C_{2,B}, C_{3,B}) \in \chi \quad \text{Formel 7-9}$$

χ ist dabei eine kompakte Menge in der sich die Parameter bewegen dürfen und vom Anwender vorgegeben werden muss.

Problematisch ist allerdings, dass für $\tau(\mathbf{c})$ kein bekannter Funktionszusammenhang vorliegt und die Ermittlung von Stützpunkten durch die notwendige Simulation mit hohem Zeitaufwand verbunden ist, weswegen sich beispielsweise stochastische Approxi-

mationsverfahren nicht eignen (Brochu & Cora et al. 2010). Zur effizienten Lösung solcher Optimierungsprobleme eignet sich nach (Brochu & Cora et al. 2010) jedoch der Ansatz der Bayes'schen Optimierung. Ein Kerngedanke hierbei ist, dass auf der Basis weniger Beobachtungen $\mathcal{D}_{1:i} = \{\mathbf{c}_{1:i}, \tau(\mathbf{c}_{1:i})\}$ τ als Gauß'scher Prozess GP modelliert werden kann. Vereinfacht gesagt, kann zunächst ein Surrogatmodell in Abhängigkeit des Erwartungswerts m und der Kovarianz k abgeleitet werden, s. Formel 7-10 (Brochu & Cora et al. 2010).

$$\tau(\mathbf{c}) \sim GP(m(\mathbf{c}), k(\mathbf{c}, \mathbf{c}')) \quad \text{Formel 7-10}$$

Darauf basierend lässt sich eine Aquisitionsfunktion α_A berechnen, die eine Abwägung zwischen Exploration, also dort wo GP sehr unsicher ist, und Exploitation, also dort, wo ein hoher Funktionswert von GP zu erwarten ist, darstellt (Shahriari & Swersky et al. 2016).

Durch die Maximierung der Aquisitionsfunktion werden die nächsten Parameter $C_{1,B,i+1}, C_{2,B,i+1}, C_{3,B,i+1}$ identifiziert, woraus eine neue Fließkurve $\sigma_{f,B,i+1}$ berechnet und die Simulation erneut durchgeführt wird. Anschließend wird τ_{i+1} ausgewertet, dem bestehenden Datensatz hinzugefügt, wodurch GP verfeinert werden kann, bis abschließend $\min \tau(\mathbf{c})$ und damit der ideale Parametersatz \mathbf{c}^* gefunden wird. (Brochu & Cora et al. 2010; Shahriari & Swersky et al. 2016)

Zur Anwendung der Optimierungsmethode wird die bestehende Pythonbibliothek *bayesian-optimization* von (Nogueira 2014)¹⁵ verwendet. Aus programmiertechnischen Gründen wird für die Optimierung der reziproke Wert von τ verwendet und ein Maximierungsproblem gelöst, was allerdings auf die Vorgehensmethodik keinen Einfluss hat.

Resultat der Optimierung

Zur exemplarischen Anwendung der Optimierung werden 100 Iterationen gerechnet, was mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden kann. Zur Minimierung des Optimierungsaufwands werden die Randbedingungen auf Basis von Domänenwissen möglichst geringgehalten und auf die Intervalle $C_{1,B,RB} = [5, 20]$, $C_{2,B,RB} = [0, 15]$ und $C_{3,B,RB} = [5, 100]$ festgelegt. Die Parameter für Simulationslauf Nr. 1 werden mit

¹⁵ Nogueira, F. (2014), *Bayesian Optimization: Open source constrained global optimization tool for Python*. <https://github.com/fmfn/BayesianOptimization> [26.04.2025].

$C_{1,B,1} = 11,26$, $C_{2,B,1} = 10,8$ und $C_{3,B,1} = 5,011$ zufällig gesetzt. Es zeigt sich, dass Iteration Nr. 74 mit $C_{1,B,74} = 6,45$, $C_{2,B,74} = 10,94$ und $C_{3,B,74} = 73,34$ die geringste Abweichung von den experimentellen Daten aufweist. In Abbildung 7-9 sind hierzu die experimentelle Biegekurve sowie die beiden Simulationsläufe Nr. 1 und Nr. 74 dargestellt.

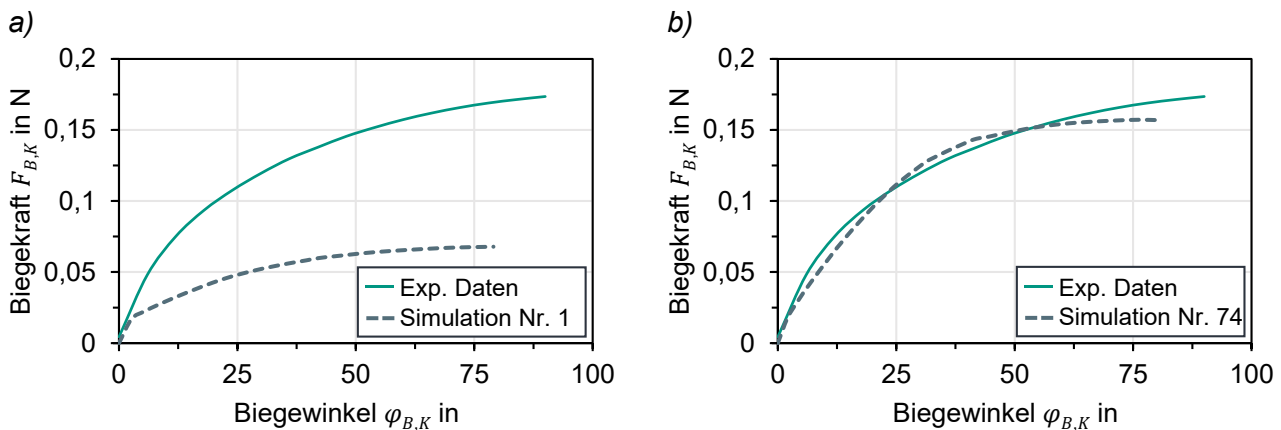


Abbildung 7-9: Vergleich der experimentellen 2-Punkt-Biegekurve mit Simulationslauf Nr. 1 und $\tau_1 = 0,071$ in a) und mit Simulationslauf Nr. 74 und $\tau_{74} = 0,0047$ in b)

Lediglich ab $\varphi_{B,K} = 60^\circ$ scheint der Verlauf von Nr. 74 auseinander zu driften, was aber für den Anwendungsfall toleriert werden kann, da keine derart großen Verformungen zu erwarten sind.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass $\sigma_{f,B}$ an die experimentellen Daten gefittet wurde. Es kann allerdings keine Aussage dazu getroffen werden, ob die Fließkurve dabei das physikalische Verhalten exakt abbildet. (Gupta & Üçel et al. 2020) zeigen, dass sich Zug- und Druckeigenschaften der Beschichtung unterscheiden. Durch die hier vorgestellte Methode und die doppelseitig beschichtete Kathode werden jedoch beide Eigenschaften miteinander vermischt, sodass eine Separation in Zug- bzw. Druckverhalten nicht möglich, jedoch an dieser Stelle auch nicht notwendig ist.

7.1.2.3 Verifikation des Materialmodells

Die durchgeführte Optimierung stellt sicher, dass das Biegeverhalten der Kathode mit hinreichender Genauigkeit abgebildet werden kann. Zu verifizieren ist nun, dass das Materialmodell hinreichend genau das Zugverhalten abbildet, sodass nachgewiesen werden kann, dass die Art der Materialmodellierung für die Kathode zulässig ist. Hierzu wird ein Simulationsmodell eines Zugversuchs der Kathode in Abaqus implementiert,

wodurch simulativ das Spannungs-Dehnungsdiagramm berechnet und anschließend mit den in Kapitel 7.1.2.1 erhobenen Zugversuchsdaten abgeglichen werden kann.

Das Simulationsmodell in Abaqus besteht lediglich aus der dreischichtigen Kathodenprobe. Jede Schicht wird mit 530 S4R-Elementen diskretisiert und mittels Tie Constraints fest miteinander verbunden. Die Abmaße der Probe entsprechen den experimentellen Proben, s. Kapitel 7.1.2.1. Die Materialparametrierung erfolgt analog zur 2-Punkt-Biegeversuchssimulation, zuzüglich der ermittelten Fließkurve $\sigma_{f,B}$. An einer der beiden kurzen Seiten der Probe werden alle sechs Freiheitsgrade fest fixiert, an der gegenüberliegenden Seite werden alle Freiheitsgrade bis auf die Zugrichtung fixiert. In Zugrichtung der Probe wird eine Verschiebung von 2 mm aufgebracht und die resultierende Kraft über die aktuelle Verschiebung ausgewertet. Anschließend werden die Simulationsdaten mittels Formel 7-1 und Formel 7-2 in das Spannungs-Dehnungs-Diagramm überführt. In Abbildung 7-10 a) sind die Ergebnisse im Vergleich mit den experimentellen Daten abgebildet.

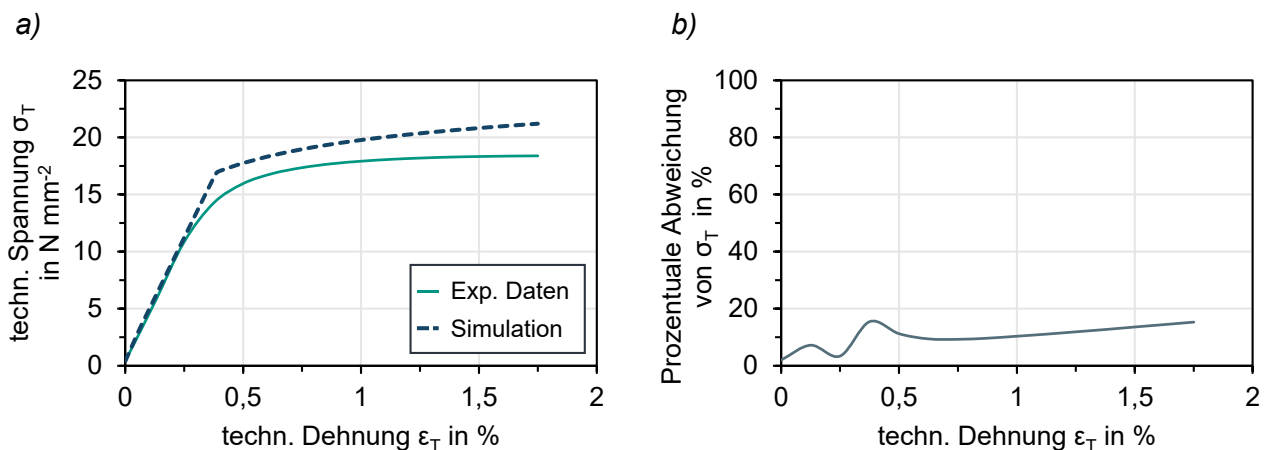


Abbildung 7-10: Vergleich der Zugversuchssimulation mit dem Experiment in a) und die prozentuale Abweichung der Simulation im Vergleich zu den experimentellen Daten in b)

Wie zu erwarten war, bildet der elastische Bereich der simulierten Zugkurve die experimentellen Daten sehr gut ab, da die E-Module E_K und E_{Al} aus den Daten berechnet wurden. Im plastischen Bereich ist eine Abweichung festzustellen, die jedoch maximal 15,5 % beträgt. Die Berechnung der prozentualen Abweichung erfolgte für jeden Datenpunkt einzeln, woraus sich der entsprechende Kurvenverlauf in Abbildung 7-10 b) ergibt. Die Abweichung kann, wie bereits bei der Substratfolie diskutiert, hauptsächlich

auf die Nutzung von $R_{p0,2}$ und der Überschätzung des Fließbeginns zurückgeführt werden. Im Mittel beträgt die Abweichung jedoch nur 10,48 %, was für eine Simulation als gute Annäherung und hinreichend genau angenommen werden kann. Somit kann die gezeigte Modellierung des Materialverhaltens in die Simulation der Stapelgenauigkeit übernommen werden.

7.2 Validierung des Simulationsmodells

Das entwickelte Simulationsmodell für die Stapelgenauigkeit wird mit den experimentellen Versuchen aus Kapitel 6.5.2 validiert. Hierzu wird zunächst in Kapitel 7.2.1 die konkrete Parametrierung des Modells vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 7.2.2 die Simulationsergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

7.2.1 Parametrierung des Modells

Da sich die Abmaße als signifikanter Parameter für die Ausbildung der Stapelgenauigkeit herausgebildet haben, ist es naheliegend, die Validierung anhand der in Kapitel 6.5.2 durchgeführten Untersuchung des Maßeinflusses auf die Ablage des Einzelblattes auf dem Stapel durchzuführen. In Summe wird die Simulation demzufolge mit vier unterschiedlichen Abmaßen der Kathoden validiert (s. Tabelle 6-7 in Kapitel 6.5.2).

Hierfür werden zunächst alle 24 Einzelblätter, die in vier unterschiedlichen Maßkonfigurationen vorliegen, einzeln vermessen, sodass die Kathoden exakt den Maßen entsprechend modelliert werden können und der Toleranzeinfluss minimiert wird.

Bei der Vermessung der Kathoden wird der Stapeltisch des Versuchstands genutzt, um die Kathoden mittels der Niederhalter zu fixieren, sodass Ungenauigkeiten hinsichtlich möglicher Unebenheiten minimiert werden. Die Kathoden werden für die Validierung ohne Unebenheiten modelliert, da die Welligkeit bei den experimentellen Ergebnissen kaum einen Einfluss zeigen.

Jedes modellierte Einzelblatt wird entsprechend seiner initialen Position in das Simulationsmodell implementiert. Die initiale Position ist dabei so ausgerichtet, dass das Kathodenblatt in etwa einen 2 mm Überlapp zur linken und unteren Seite des Stapeltisches hat, wobei in die Simulation die real gemessenen Werte implementiert werden, um die Simulationsgenauigkeit zu maximieren. Die Schieberverfahren mit einer Geschwindigkeit von 35 mm s^{-1} . Die Anpresskraft des Greifers wird mit 220 N, die der vier Niederhalter mit 120 N modelliert. Bis auf das Zusammenfahren der Schieber wird jeder Simulationsschritt in einer Zeitperiode von 1 s simuliert. Das Zusammenfahren der

Schieber wird aufgrund deren hoher Geschwindigkeit und der kurzen Verfahrdistanz mit einem Zeitschritt von 0,1 s simuliert.

Da die Validierungsversuche ebenfalls mit der Materialkonfiguration NMC811, 41,6 mg cm⁻² Massenbeladung und 15 % Verdichtungsgrad durchgeführt wurden, können die ermittelten Parameter aus der Materialmodellierung verwendet werden. Zusammengefasst finden sich diese mit weiteren aus der Literatur vorliegenden Parametern in Tabelle 7-1.

Tabelle 7-1: Materialparameter zur Validierung des Simulationsmodells

Parameter	Wert	Einheit / ggf. Quelle
E-Modul E_{Al}	45670	MPa
E-Modul E_B	759,87	MPa
Poissonzahl ν_{Al}	0,33	[-] / (Sahraei & Bosco et al. 2016)
Poissonzahl ν_B	0,25	[-] / (Woodcox & Shepard et al. 2021)
Reibkoeffizient μ	0,26	[-] / (Müller & Aydemir et al. 2021)
Konstanten $C_{1,Al}; C_{2,Al}; C_{3,Al}$	197,63; 19,78; 324,64	MPa, MPa, [-]
Konstanten $C_{1,B}; C_{2,B}; C_{3,B}$	6,45; 10,94; 73,34	MPa, MPa, [-]

Zur Ermittlung einer geeigneten Elementgröße wird eine Netzkonvergenzstudie durchgeführt, in der die Elementkantenlänge L_{Mesh} systematisch variiert wird. Der Zielparameter ist hierbei die Verschiebung u_p der vier Kathodeneckpunkte $P_1 - P_4$ in der Tischebene während der Simulation. Zur Bewertung der Konvergenzanalyse wird zusätzlich die Rechenzeit des jeweiligen Simulationslaufs t_{sim} aufgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-11 dargestellt.

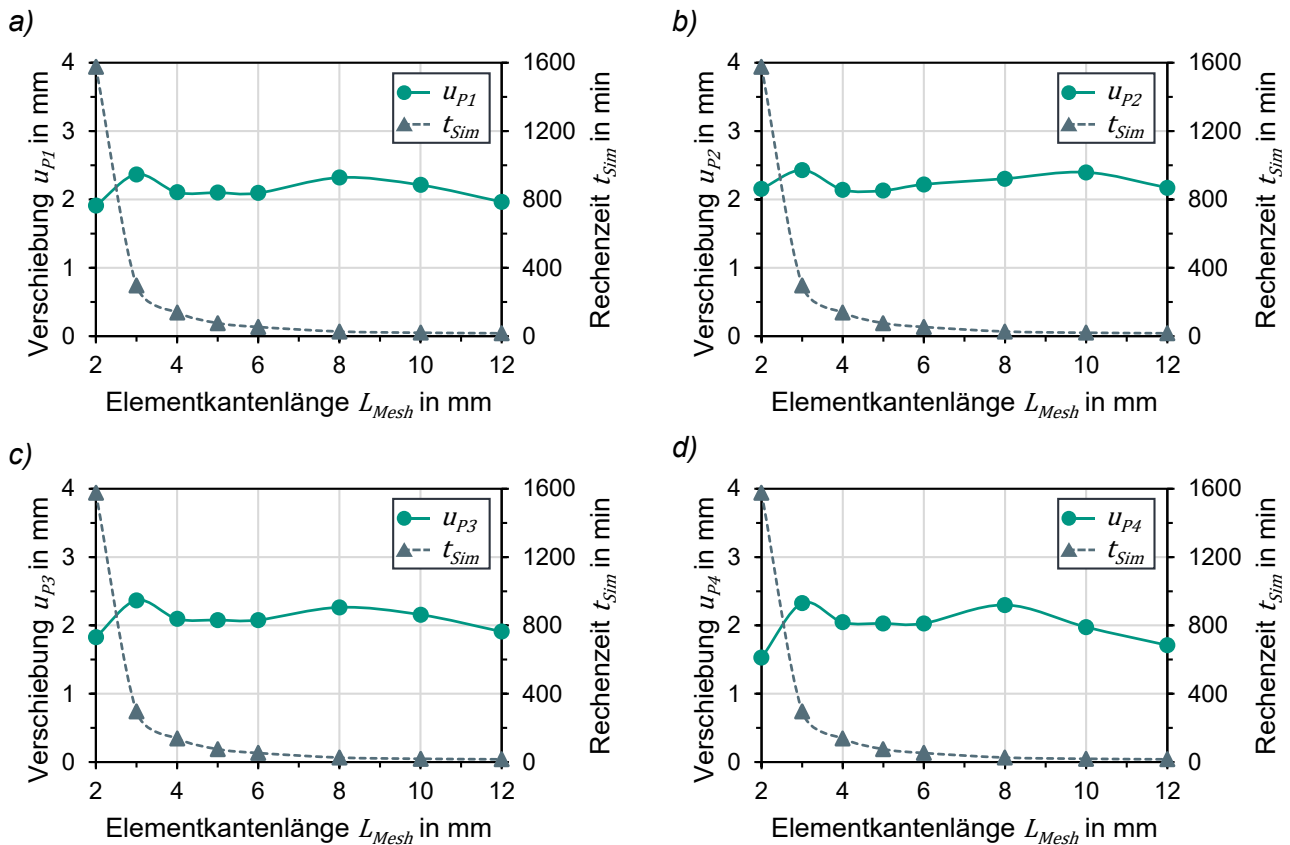


Abbildung 7-11: Konvergenzanalyse zur Ermittlung einer geeigneten Elementgröße für die vier Eckpunkte der Kathode P_1 in a), P_2 in b), P_3 in c) und P_4 in d).

Wie zu erwarten, nimmt die Rechenzeit t_{sim} mit sinkender Elementkantenlänge L_{Mesh} zu. Insbesondere bei kleinen Elementkantenlängen steigt die Rechenzeit überproportional an, was sich direkt auf die Elementanzahl zurückführen lässt. Es zeigt sich, dass die Zielgröße u_p um etwa 2 mm pendelt, was in der Größenordnung aufgrund der initialen Positionierung des Kathodenblatts so auch zu erwarten ist. Das Pendelverhalten ist insofern zu erklären, als dass sich durch das in der Konvergenzstudie simulierte Kathodenübermaß Welligkeiten ausbilden, die sich in Wechselwirkung mit dem Ableiter und der jeweiligen Elementgröße und -verteilung in ihrer Ausprägung leicht unterscheiden. Im Bereich der Elementkantenlängen von $L_{Mesh} = 4 \text{ mm}$ bis $L_{Mesh} = 6 \text{ mm}$ stellt sich jedoch eine stabile, gleichbleibende Ausprägung der Zielgröße ein. Mit Rechenzeiten von $t_{sim} = 53,45 \text{ min}$ bis $t_{sim} = 138,83 \text{ min}$ sind diese Elementkantenlängen zudem ein akzeptabler Kompromiss, sodass sich für eine Elementkantenlänge von $L_{Mesh} = 4 \text{ mm}$ für weitere Simulationen entschieden wird.

7.2.2 Abgleich der Simulation mit den Versuchsergebnissen

Zur Bewertung der Simulationsgüte werden Simulationsläufe mit unterschiedlichen Kathodenabmaßen durchgeführt und die Ergebnisse mit den experimentellen Versuchen und deren Übereinstimmung abgeglichen. Als Basis hierfür dienen die in Kapitel 6.5.2 durchgeführten Versuche mit NMC811, 15 % Verdichtungsgrad, 41,6 mg cm⁻² Massenbeladung und Ablageseite B, s. Tabelle 6-7. Variiert werden die Abmaße der Kathoden entsprechend der vier Kategorien Übermaß (209 mm x 136 mm), Nennmaß (208 mm x 135 mm), Untermaß 1 (207,5 mm x 134,5 mm) und Untermaß 2 (207 mm x 134 mm). Die genauen Abmaße der einzelnen Kathoden sowie auch deren initiale Positionierung auf dem Ausrichttisch zu Beginn werden jedoch aus den 3D-Messungen extrahiert, um mögliche Fehlerquellen durch Toleranzen zu minimieren. Für jeden der 24 Versuche wird das Simulationsmodell entsprechend parametrisiert und berechnet.

Für den Abgleich der Simulation mit den experimentellen Versuchen werden als Zielgrößen die betragsmäßigen Differenzen der Eckpunktverschiebungen $|\Delta u_p|$ von Simulation und Experiment in x - bzw. y -Richtung berechnet. Aufgeteilt nach den jeweiligen Maßkategorien der Kathoden finden sich die Ergebnisse in Abbildung 7-12.

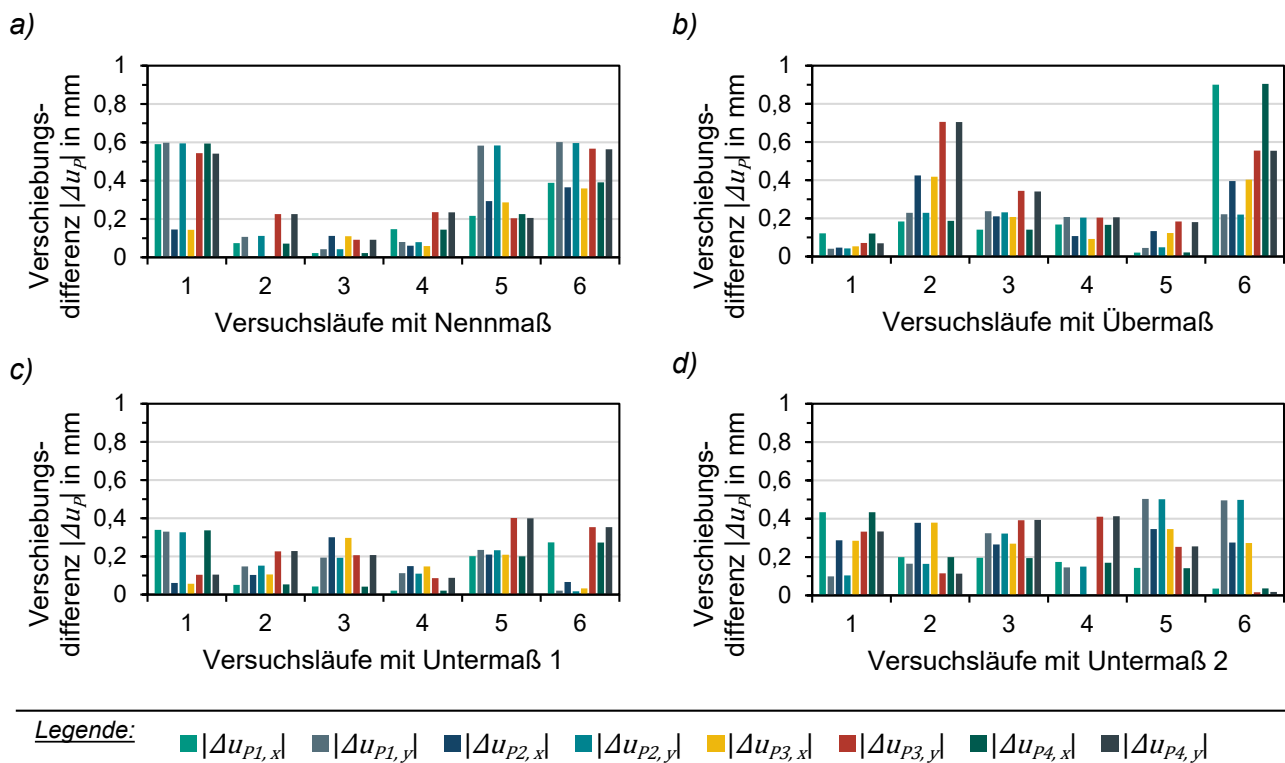


Abbildung 7-12: Betragsmäßige Differenz der Eckpunktverschiebungen $|\Delta u_p|$ zwischen Simulation und Experiment in x - und y -Richtung für Nenn- und Übermaß und Untermaß 1 & 2

Bei der Analyse der Ergebnisse zeigt sich, dass sich bei dem überwiegenden Anteil der Simulationsergebnisse Abweichungen von $\leq 0,5$ mm von den experimentellen Versuchen auftreteten. Lediglich fünf der 24 Simulationen haben eine größere Abweichung, wovon drei Simulationen wiederum eine Abweichung von $\leq 0,6$ mm erreichen. Nur zwei Simulationen haben eine Abweichung von 0,7 mm bzw. 0,9 mm. Das Auftreten der höheren Abweichungen bei dem Kathodenübermaß spricht dafür, dass durch die vier zusammenfahrenden Schieber sowie dem darauffolgenden Kontakt mit dem Greifer Effekte auftreten, die in der Simulation nicht abgebildet werden, beispielsweise Welligkeiten und nicht perfekte Schnittkanten. Der Gesamtdurchschnitt aller betragsmäßigen Abweichungen in x - und y -Richtung liegt bei 0,233 mm. Aufgeteilt auf die jeweiligen Achsen ergeben sich für die x -Richtung 0,204 mm und für die y -Richtung 0,262 mm.

Abbildung 7-13 a) zeigt darüber hinaus, dass 50 % aller Simulationen im Bereich von -0,2 mm bis +0,12 mm in x -Richtung und von -0,25 mm bis +0,11 mm in y -Richtung von den experimentellen Versuchen abweichen. Die Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 7-13 b) und c) zeigen zudem, dass im Bereich $\pm 0,25$ mm in x -Richtung 66,67 %

und in y -Richtung 62,5 % aller Werte liegen. Für den Bereich $\pm 0,35$ mm sind es bereits 83,33 % bzw. 72,92 % aller Simulationsläufe.

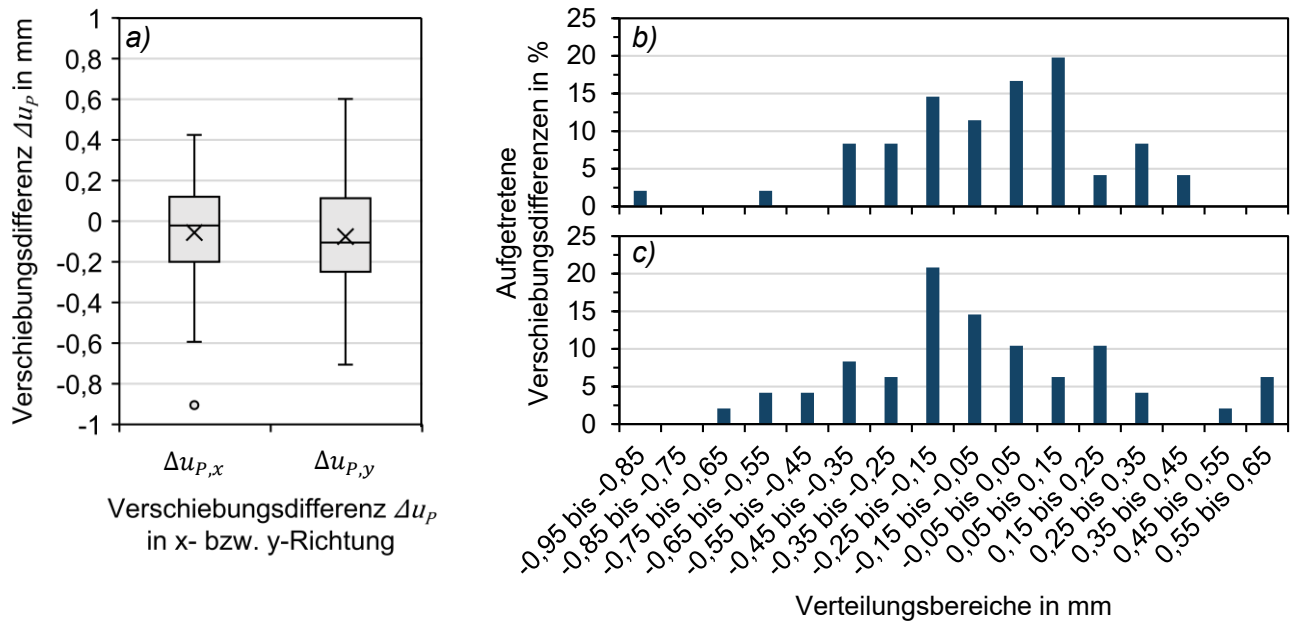


Abbildung 7-13: Verschiebungsdifferenzen zwischen Simulation und Experiment für x - und y -Richtung in a) und die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Verschiebungsdifferenzen für die x -Richtung in b) und die y -Richtung in c)

Bei einer gegebenen Einzelblattgeometrie kann mittels des Simulationsmodells somit die Stapelgenauigkeit mit einer Ungenauigkeit von $+0,42$ mm bzw. $-0,59$ mm in x -Richtung und $+0,60$ mm bzw. $-0,71$ mm in y -Richtung ermittelt werden. Da der Großteil der Ergebnisse eine Abweichung von $\pm 0,35$ mm vorweisen, kann jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit das Ergebnis auf diesen Korridor eingegrenzt werden.

Neben der Erweiterung des generellen Verständnisses über das Verhalten toleranzbehafteter Kathodenblätter in der Einzelblattstapelbildung kann das Simulationsmodell dafür genutzt werden, die Stapelgenauigkeit eines Stapels vorherzusagen. Hierzu müssen alle toleranzbehafteten Kathodenblätter des Stapels einzeln simuliert werden, sodass anschließend die simulierten Eckpunkte zu einer resultierenden Stapelgenauigkeit virtuell übereinandergelegt werden können. Auf Basis der Validierungsergebnisse kann hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit festgestellt werden, dass wenn sich über die simulierten Eckpunkte ein Rechteck von $\pm 0,15$ mm legen lässt, mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Stapelgenauigkeit von $\pm 0,5$ mm erzielt werden kann. Die Annahme liegt darin begründet, dass in der Validierung 83,33 % bzw. 72,92 % der Simulationsergebnisse $\leq \pm 0,35$ mm von den gemessenen Werten abweichen.

Bei einer Streuung der Simulationsergebnisse in den Eckpunkten von $\pm 0,25$ mm reduziert sich die Wahrscheinlichkeit der Aussage entsprechend.

Exemplarisch wird das validierte Modell in Kapitel 7.3 nun genutzt, um die Auswirkungen des Cambereffekts auf die Einzelblattstapelbildung zu untersuchen und somit das generelle Verständnis des Verhaltens toleranzbehafteter Kathodenblätter in der Einzelblattstapelbildung zu erweitern.

7.3 Exemplarische Anwendung und Bewertung des Modells

Das entwickelte und validierte Modell wird in Kapitel 7.3.1 exemplarisch dazu verwendet, mögliche Auswirkungen des Cambereffekts auf die Stapelgenauigkeit zu untersuchen. Abschließend erfolgt in Kapitel 7.3.2 eine Bewertung des Modells und eine Diskussion über weitere Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen des Modells.

7.3.1 Auswirkung des Cambereffekts auf die Stapelgenauigkeit

In den experimentellen Versuchsreihen aus Kapitel 5 und 6 stand die Untersuchung des Einflusses des Cambereffekts nicht im Fokus. Das Simulationsmodell bietet allerdings die Möglichkeit, dessen Einflüsse auf die Stapelgenauigkeit gesondert zu untersuchen. Unter der Annahme, dass eine Ausbauchung s_c in der Kathode aufgrund des Cambereffekts auch nach der Vereinzelung zurückbleibt, stellt sich die Frage, welchen Einfluss dies auf die resultierende Stapelgenauigkeit hat, s. Abbildung 7-14.

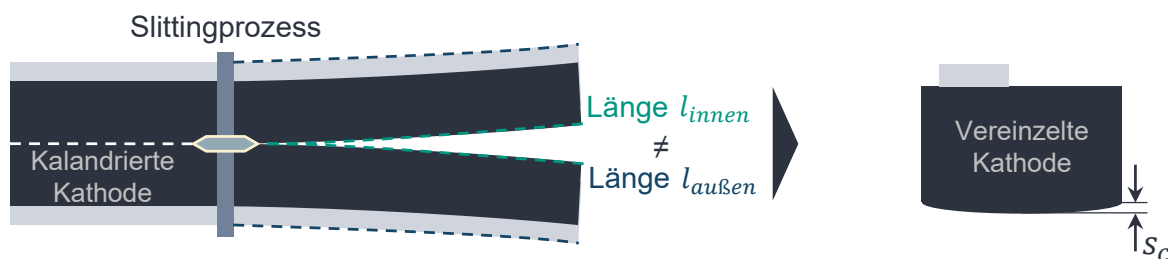


Abbildung 7-14: Mögliche Auswirkung des Cambereffekts auf ein einzelnes Kathodenblatt in Anlehnung an (Weinmann 2022, S. 31)

Hierzu wird mit den gleichen Materialparametern wie bei der Validierung (s. Tabelle 7-1) eine Simulationsstudie durchgeführt. Die Eckpunkte und damit die Abmaße der Kathode werden entsprechend der in der Simulation integrierten Maße des Tisches implementiert, sodass die Kathode für die Simulation als „perfektes“ Nennmaß definiert ist. Der einzige Parameter des Kathodenblatts, der in der Simulation variiert wird, ist die Ausbauchung s_c , die in die gegenüberliegende Seite des Ableiterfähnchens integriert

wird. Für die Ausprägung von s_c wird sich an den Arbeiten von (Tran & Lindner et al. 2023) orientiert, wo Cambereffekte in einem Bereich von etwa $s_c = 0,01 \text{ mm}$ bis $s_c = 1,94 \text{ mm}$, jeweils pro 250 mm, gemessen wurden. Darüber hinaus wird dort eine industrieseitige Akzeptanz von $s_c = 1,5 \text{ mm}$ pro 1 m angegeben. Darauf basierend werden für die Simulationsstudie fünf Simulationsläufe mit den Ausbauchungen $s_c = 0,25 \text{ mm}$, $s_c = 0,5 \text{ mm}$, $s_c = 0,75 \text{ mm}$ und $s_c = 1 \text{ mm}$, sowie mit $s_c = 0 \text{ mm}$ als Referenz, auf die Länge des Kathodenblatts von etwa 208 mm definiert. Abbildung 7-15 zeigt die Ergebnisse der Simulationsstudie.

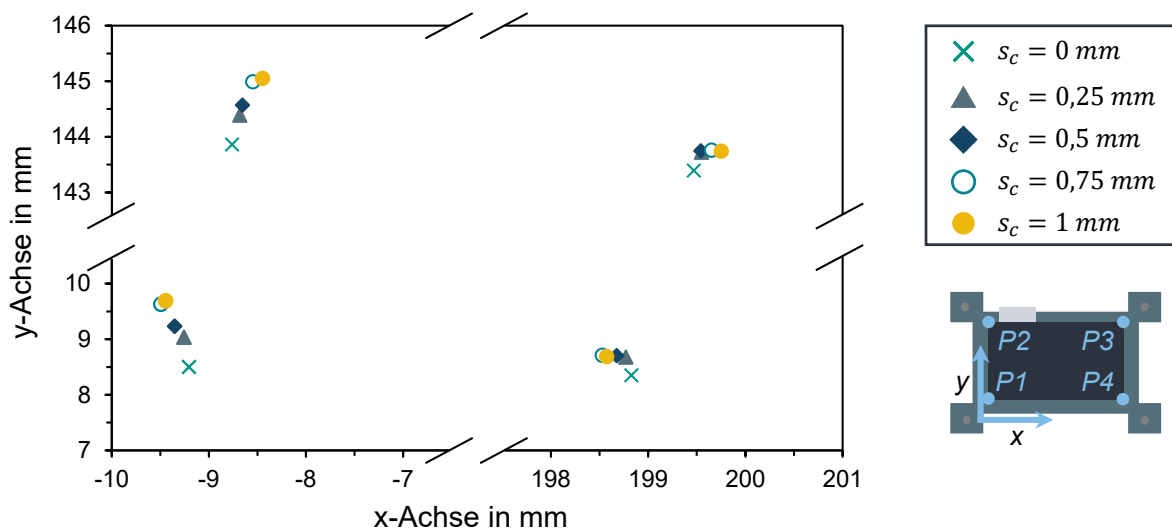


Abbildung 7-15: Simulative Untersuchung unterschiedlicher Ausprägungen des Cambereffekts auf die Stapelgenauigkeit anhand der Position der vier Eckpunkte

Die Ergebnisse zeigen zwei Bewegungseffekte. So findet im Vergleich zur Simulation mit $s_c = 0 \text{ mm}$ zunächst eine translatorische Verschiebung der Kathode in y -Richtung statt. Durch die Ausbauchung der Kathode kommt diese als Erstes in den Kontakt mit dem Schieber, sodass die Verschiebung gleich zu Beginn des Schiebereingriffs stattfindet. Sobald die Schieber jedoch weiter zum Tisch fahren, kommen alle vier Schieber in den Eingriff, sodass eine Verformung der Kathode stattfindet. Bedingt durch den kleineren, asymmetrisch angeordneten Schieber auf der Seite des Ableiterfährchens, findet zusätzlich zur Translation eine Rotation um die z -Achse statt, da die Kathode durch die fehlende Schieberfixierung am Ableiter bei Eckpunkt P_2 in y -Richtung ausweichen kann. Tendenziell nehmen Translation und Rotation bei einer stärkeren Ausprägung der Ausbauchung s_c zu, was so auch zu erwarten ist.

Die Betrachtung der betragsmäßigen Abweichung der Simulationen mit $s_c = 0,25 \text{ mm}$ bis $s_c = 1 \text{ mm}$ von der Referenzsimulation in Abbildung 7-16 zeigt, dass erwartungsgemäß die Abweichungen in x -Richtung deutlich geringer ausfallen als in y -Richtung. Ebenso zeigt sich der Einfluss der Rotation in der Verschiebung in y -Richtung, wo die Abweichungen in P_1 und P_2 deutlich größer ausfallen als bei P_3 und P_4 .

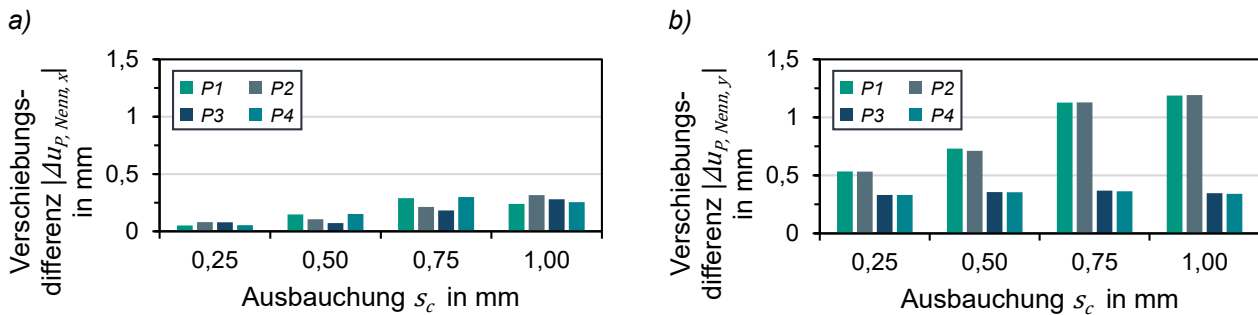


Abbildung 7-16: Betragsmäßige Abweichung der Simulationen von der Referenz in x -Richtung $|\Delta u_{P,Nenn,x}|$ in a) und in y -Richtung $|\Delta u_{P,Nenn,y}|$ in b)

Im Hinblick auf eine geforderte Stapelgenauigkeit von $\pm 0,5 \text{ mm}$ zur Referenzsimulation kann festgestellt werden, dass diese selbst bei einer Ausbauchung von lediglich $s_c = 0,25 \text{ mm}$ mit einer maximalen Verschiebungsdifferenz von $|\Delta u_{P,Nenn}| = 0,534 \text{ mm}$ nicht erreicht werden kann. Für eine abschließende Beurteilung müssten allerdings auch zu erwarteten Toleranzen in Längen- und Breitenmaß der Kathode und auch mögliche Toleranzanforderungen an die Kanten des finalen Stapels berücksichtigt werden, was jedoch nicht mehr im Fokus der vorliegenden Arbeit liegt.

Weiterhin kann als Handlungsempfehlung für eine verbesserte Präzision der Einzelblattstapelung bei Auftreten des Cambereffekts vorgeschlagen werden, den Schieber auf der Seite des Ableiterföhnchens so zu gestalten, dass ein Kontakt sowohl rechts als auch links vom Ableiterföhnchen stattfindet. Dadurch wäre es möglich, die Rotation der Kathode zu mindern und die Kathode auch mit Ausbauchung besser zu zentrieren.

Abschließend ist anzumerken, dass aufgrund der Charakteristik des Stapeltisches sowie der in das Modell integrierten gemessenen Tischmaße die Ergebnisse nur für den in der Arbeit konstruierten Versuchsstand gelten. Für eine Übertragung der Ergebnisse auf weitere Stapelanlagen müssen jeweils die konkreten Maße der zu modellierenden Anlage übernommen werden.

7.3.2 Bewertung und kritische Diskussion des Modells

In Kapitel 7.3.1 wurde gezeigt, dass sich mit dem entwickelten Modell mögliche Auswirkungen des Cambereffekts auf die Stapelgenauigkeit untersuchen lassen. (Mayer & Maier et al. 2023) zeigen darüber hinaus, dass ein derartiges Modell genutzt werden kann, um das Verhalten weiterer Toleranzausprägungen in Kathodenblättern bei der Einzelblattstapelung zu untersuchen. So werden Kathodenblätter mit Über- und Untermaß in der Länge sowie Toleranzausprägungen in Form eines Parallelogramms untersucht. Ebenso wird der Einfluss von Welligkeiten im Kathodenblatt simuliert.

Die Ergebnisse in Kapitel 7.3.1 sowie die Arbeiten in (Mayer & Maier et al. 2023) zeigen das Potenzial des entwickelten Modells im Hinblick auf die Bewertung von Maßtoleranzen von vereinzelt Kathodenblättern. Insbesondere bei verrundeten oder nicht parallelen Kanten kann der Einfluss von Maßabweichungen in den Einzelblättern nicht mehr abgeschätzt werden, da die Interaktion mit den Schiebern, den Niederhaltern und dem Greifer sowie auch die Wechselwirkungen mit dem Ableiterföhnchen zu komplex werden. Darüber hinaus kann das Modell dazu genutzt werden, die Genauigkeit eines Stapels vorherzusagen, indem die verwendeten toleranzbehafteten Kathodenblätter einzeln simuliert und anschließend deren Eckpunktpositionen virtuell übereinandergelegt werden. So können beispielsweise Prozessschwankungen bei der Vereinzeltung der Kathodenblätter im Hinblick auf die weitere Verarbeitung im Stapelprozess beurteilt werden.

Grenzen hingegen ergeben sich bei der aktuell erzielbaren Genauigkeit des Modells. So muss bei der Simulation einzelner Kathoden eine Unsicherheit von etwa $\pm 0,35$ mm in Kauf genommen werden. Hinsichtlich der Simulation eines ganzen Stapels müssen die Simulationsergebnisse aller Kathodenblätter somit innerhalb eines Toleranzfensters von $\pm 0,15$ mm liegen, damit ein Rückschluss, ob eine Stapelgenauigkeit von $\pm 0,5$ mm erreicht werden kann, mit hoher Wahrscheinlichkeit zulässig ist. Die Gründe für die auftretenden Ungenauigkeiten der Simulation liegen darin, dass aktuell nicht alle Effekte, beispielsweise nicht perfekt gerade Schnittkanten oder Welligkeiten, abgebildet werden. Einzeln betrachtet haben sie auf das Ergebnis zwar nur einen geringen Einfluss, in Summe allerdings führen sie zu spürbaren Ungenauigkeiten in der Simulation. Auch Annahmen im Materialmodell, die messtechnische Erfassung von Parametern sowie mögliche Materialeigenspannungen führen zwangsläufig zu Abweichungen in der Genauigkeit.

Für einen industriellen Einsatz muss das Modell somit hinsichtlich der Genauigkeit weiter verfeinert werden. Eine Möglichkeit ist die Erhöhung der Diskretisierung des FE-Netzes, wodurch insbesondere Welligkeiten in der Kathode nach der Fixierung durch die Schieber vor dem Kontakt mit dem Greifer besser abgebildet werden könnten. Ebenso können softwareseitige Werkzeuge entwickelt werden, sodass nicht nur die realen Kantenabmaße des Kathodenblatts in die Simulation übernommen werden, sondern auch die gesamte 3D-Geometrie des Blattes. Im Hinblick auf großformatige Batteriezellen müssen bei allen Maßnahmen jedoch erheblich höhere Rechenzeiten in Kauf genommen werden.

Dennoch kann die Simulation schon heute eine wichtige qualitative Einschätzung geben, sodass insbesondere Prozesstoleranzen im Prozessschritt der Vereinzelung von Elektrodenblätter gezielt ausgelegt werden können. Weitere Anwendungsmöglichkeiten können in Zukunft beispielsweise die anlagenseitige Untersuchung des Einflusses der Greifer- und Niederhalterfläche auf die Stapelgenauigkeit sein, um eine höchstmögliche Flexibilität des Greifers zu gewährleisten, indem dessen Fläche minimiert wird. Darüber hinaus ist auch eine systematische Untersuchung des Toleranzeinflusses bei nicht rechteckigen toleranzbehafteten Kathodenblättern denkbar, wie sie beispielsweise in formatflexiblen Batteriezellfertigungen verarbeitet werden können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein Simulationsmodell entwickelt wurde, das den Prozess der Einzelblattstapelbildung in Abhängigkeit der Geometrie der Elektrodenblätter abbilden kann. Ebenso wurde in die Simulation erfolgreich ein neuer Ansatz zur Modellierung des Materialverhaltens einer doppelseitig beschichteten Kathode implementiert. Das Modell hat zwar weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit, aber schon heute können insbesondere qualitative Prozesseinflüsse untersucht werden, um die Entwicklung und Auslegung von Anlagen und Prozessen aus Sicht der Stapelbildung zu unterstützen. Darüber hinaus wurde aufgezeigt, welche Ansätze verfolgt werden können, um das Modell erfolgreich in der Industrie einsetzen zu können. Abschließend lässt sich feststellen, dass die verbleibenden zwei Forschungsfragen hinsichtlich der prozess- und materialeseitigen Modellierung der Einzelblattstapelbildung beantwortet werden konnten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss der vorliegenden Dissertation wird in Kapitel 8.1 eine Zusammenfassung der Arbeit sowie in Kapitel 8.2 ein Ausblick auf mögliche anknüpfende Forschungsarbeiten gegeben.

8.1 Zusammenfassung

Die Elektromobilität und die damit verbundenen Bestrebungen zur Elektrifizierung des Antriebstrangs von Fahrzeugen lassen die globale Nachfrage nach Batteriezellen stark ansteigen. Dies führt dazu, dass weltweit immense Anstrengungen unternommen werden, entsprechende Kapazitäten zur Herstellung von Batteriezellen bereitzustellen. Die komplexe Prozesskette stellt allerdings eine große Herausforderung dar und führt zu langwierigen Entwicklungs- und Inbetriebnahmephasen der Anlagen und Prozesse.

Trotz intensiver Forschungsaktivitäten im Bereich der Batteriezellfertigung sind bisher nicht alle Prozessschritte und deren prozessübergreifenden Wirkzusammenhänge im Detail verstanden. Insbesondere bei der Einzelblattstapelbildung zeigt sich, dass ein systematisches Verständnis des Einflusses der Kalandrierung und der Vereinzelnung auf die Geometrie der Einzelblattelektrode sowie deren Einfluss auf die Stapelgenauigkeit fehlt. Ebenso ist das Verfahren der Einzelblattstapelbildung im Bereich der Modellierung und Simulation nur unzureichend untersucht. So sind bis heute kaum geeignete Modelle verfügbar, die die Stapelgenauigkeit abbilden können. Insbesondere die Vorhersage der Stapelgenauigkeit kann jedoch entscheidende Vorteile bei der Anlagen- und Prozessentwicklung bringen, beispielsweise bei der Definition von Toleranzgrenzen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, ein umfassendes Verständnis der prozessübergreifenden Wirkzusammenhänge zu erarbeiten. Im Fokus steht die Untersuchung der toleranzbehafteten Geometrie vereinzelter Kathodenblätter und deren Auswirkung auf die Stapelgenauigkeit bei der Einzelblattstapelbildung. Darauf aufbauend soll ein Modell entwickelt werden, das die Stapelgenauigkeit auf Basis der als relevant identifizierten Einflussparameter berechnen kann.

Dazu wird in Kapitel 4 die Einzelblattstapelbildung mittels der FAST-Methode analysiert und ein Referenzprozess abgeleitet. Dieser beinhaltet die Subprozesse „Ausricht- und Greifprozess“, „Handhabungsprozess“, „Ablageprozess“ und die „Niederhalter-Greifer-

Interaktion“ mit dem Stapel. In einer Ursache-Wirkungs-Analyse werden hierfür alle relevanten Einflussgrößen auf die Stapelgenauigkeit identifiziert. Es zeigt sich, dass die Geometrie des Kathodenblatts ein wesentlicher strukturseitiger Einflussparameter darstellt. Die geometrische Ausprägung wird insbesondere durch die Kalandrierung und die Vereinzelnung beeinflusst, wobei die konkreten Zusammenhänge in bisherigen Forschungsarbeiten noch nicht untersucht wurden. Diese werden daher in Kapitel 5 ausführlich analysiert.

Hierzu werden basierend auf einem vollfaktoriellen Versuchsplan Kathodenbahnen kalandriert und die resultierenden Rand- und Mittelwellen bewertet. Dabei ist es in dieser Arbeit gelungen, eine umfangreiche Quantifizierung der Rand- und Mittenwellen für die Materialsysteme NMC622 und NMC811 zu erzielen, was bisher lediglich in Teilen für das nur noch selten genutzte Materialsystem NMC111 vorlag. Die kalandrierten Kathodenbahnen werden anschließend zu Kathodenblättern vereinzelt und deren räumliche Geometrie vermessen. Auf Grundlage von über 600 Messungen kann in dieser Arbeit erstmalig gezeigt werden, dass sich sowohl Rand- als auch Mittenwellen systematisch im Kathodenblatt fortpflanzen. Es wird detailliert herausgearbeitet, dass auch die Coilaufwicklung nach der Kalandrierung einen wesentlichen Einfluss auf die Geometrie des Kathodenblatts hat. Es zeigt sich, dass die Effekte zeitabhängig sind und sich gegenläufig verhalten, wobei die Coilbiegung bei längerer Aufwicklung deutlich stärker ausprägt ist. Zudem erhöhen sich die geometrischen Deformationen des Einzelblatts bei einem höheren Verdichtungsgrad. Insgesamt stellt die durchgeführte Quantifizierung der prozessübergreifenden Wirkzusammenhänge von der Kalandrierung bis zum vereinzelt Kathodenblatt eine deutliche Erweiterung des Prozessverständnisses gegenüber dem aktuellen Stand der Forschung und Technik dar.

In Kapitel 6 wird der Einzelblattstapelprozess und die resultierende Stapelgenauigkeit in Abhängigkeit der Geometrie der Kathodenblätter experimentell untersucht. Dazu wird ein spezieller Versuchsstand entwickelt und aufgebaut. Der Gesamtprozess wird entsprechend Kapitel 4 in die vier Subprozesse aufgeteilt und mittels statistischer Versuchsplanung detailliert untersucht. Prozessseitig zeigt sich, dass der Handhabungsprozess sowie die Niederhalter-Greifer-Interaktion hinsichtlich der Stapelgenauigkeit keinen signifikanten Einfluss haben. Im Ausricht- und Greifprozess und dem Ablageprozess hingegen wird die wesentliche Genauigkeit des Stapels erzielt. Erstmals kann nachgewiesen werden, dass die Strukturparameter Massenbeladung, Aktivmaterial, Ablage-seite und Verdichtungsgrad keinen wesentlichen Einfluss auf die Positionierung

des Kathodenblatts haben und somit nicht entscheidend auf die resultierende Stapelgenauigkeit in der Einzelblattstapelbildung einwirken. Längen- und Breitenmaße der Kathode hingegen haben einen signifikanten Einfluss. Insbesondere die erarbeiteten Erkenntnisse hinsichtlich der Ausbildung der Stapelgenauigkeit sind als hochrelevant einzustufen, da hierdurch wichtige Rückschlüsse auf die Auslegung der Prozesse in der Kalandrierung, in der Vereinzelung sowie in der Einzelblattstapelbildung möglich sind.

Die erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 7 genutzt, um ein neuartiges Modell für die Stapelbildung zu entwickeln. Es wird ein FE-Modell aufgebaut, das sowohl den Ausricht- und Greifprozess als auch den Ablageprozess abbildet. Für die Modellierung des Kathodenmaterialverhaltens wird eine neue Methode entwickelt, die mit geringem messtechnischem Aufwand die Abbildung des mechanischen Verhaltens der kalandrierten Beschichtung ermöglicht. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode bietet damit einen wesentlichen Fortschritt gegenüber bisher verwendeten Verfahren, da diese auf umfangreichen Messuntersuchungen oder teuren Versuchsaufbauten basieren. Grundlage hierfür bilden experimentelle Zug- und 2-Punkt-Biegeversuche sowie ein FE-Modell für den 2-Punkt-Biegeversuch unter Verwendung einer Bayes'schen Optimierung zur Ermittlung der Beschichtungsfließkurve. Der Ansatz zur Modellierung des Kathodenmaterialverhaltens wird mittels eines FE-Modells für einen Zugversuch verifiziert und in das Modell der Einzelblattstapelbildung implementiert. Anschließend wird das entwickelte Stapelmodell anhand experimenteller Versuche aus Kapitel 6 validiert. Es zeigt sich, dass etwa 65 % der experimentellen Versuche mit einer Abweichung von $\leq \pm 0,25$ mm und etwa 78 % mit einer Abweichung von $\pm 0,35$ mm abgebildet werden können. Die Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage, das Prozessverständnis in der Einzelblattstapelbildung mittels Simulationsunterstützung zu erweitern. Das Modell wird exemplarisch dazu genutzt, die Auswirkungen des Cambereffekts auf die Stapelgenauigkeit zu untersuchen. Es kann simulativ gezeigt werden, dass bei dieser Prozessführung sowohl eine Translation als auch eine Rotation in das Kathodenblatt induziert werden, was zu Ungenauigkeiten in der Stapelgenauigkeit führt.

Erstmalig liegt somit ein Modell vor, das die erzielte Stapelgenauigkeit nach der Einzelblattstapelbildung simulieren kann. Insbesondere im Hinblick auf die Toleranzauslegung besteht großes Potenzial, dieses zukünftig auch industriell einsetzen zu können.

Mithilfe des Modells kann bereits jetzt ein wichtiger Beitrag zu einer effizienteren Prozess- und Anlagenauslegung in der Batteriezellfertigung geleistet werden, sodass aufwändige Entwicklungs- und Inbetriebnahmeprozesse reduziert werden können.

8.2 Ausblick

Die in der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnisse sind im Wesentlichen auf die experimentellen Arbeiten zur Erweiterung des Prozessverständnisses der Wirkzusammenhänge zwischen Kalandrierung, Vereinzeln und Stapelbildung sowie der darauf basierenden Modellentwicklung der Einzelblattstapelbildung zusammenzufassen.

Zukünftig ist davon auszugehen, dass die Wirkzusammenhänge der Prozesse noch besser verstanden werden müssen, um die Batteriezellfertigung ganzheitlich effizienter zu gestalten. Vorstellbar wäre in diesem Kontext die Erweiterung der zu untersuchenden Zielgrößen, beispielsweise das Schädigungsverhalten der Beschichtung, da Biegebelastungen wiederkehrend in den Prozessen in das Material induziert werden. Dies führt zu dem Gedanken in Abhängigkeit der Zielgröße weitere Prozessschritte einzubeziehen, da beispielsweise bei einer möglichen Schädigung der Beschichtung auch zwangsläufig der Beschichtungsprozess in den Fokus gerückt werden würde.

Darüber hinaus wäre es denkbar, weitere experimentelle Untersuchungen in der Stapelbildung mit dem Fokus auf das Z-Falten durchzuführen. So sind zwar einige untersuchte Subprozesse von der Einzelblattstapelbildung auf das Z-Falten übertragbar, allerdings unterscheidet sich beispielsweise die Interaktion der Niederhalter mit dem Stapel durch den kontinuierlichen Separator in der Prozessführung. Es stellt sich somit die Frage, ob im Gegensatz zur Einzelblattstapelbildung ein Einfluss auf die Stapelgenauigkeit identifiziert werden kann.

Bei der Entwicklung des Simulationsmodells wurde sich auf die Parameter fokussiert, die die Stapelgenauigkeit am stärksten beeinflussen. Die erzielten Genauigkeiten des Modells sind zwar ausreichend, um erste Aussagen hinsichtlich der Prozessqualität zu treffen, allerdings besteht hier das Potenzial, weitere Effekte im Modell abzubilden und so die Genauigkeit zu erhöhen. Ein möglicher Aspekt kann beispielsweise die Integration der realen Ausprägungen der Schnittkanten sein, die im aktuellen Modell nur idealisiert abgebildet werden können.

Darüber hinaus konzentriert sich die Arbeit zwar hauptsächlich auf den Stapelprozess, trotzdem haben auch die Anlagentechnik und deren Parameter einen wichtigen Einfluss

auf die resultierende Prozessqualität. Für zukünftige Arbeiten ist es daher vorstellbar, sowohl den Prozess als auch die Anlagen in der Modellierung zu berücksichtigen. Hierzu wäre eine Kopplung der Anlagenmodelle, wie sie beispielsweise in (Husseini & Boschert et al. 2024; Husseini & Schmidgruber et al. 2023) vorgestellt werden, mit dem entwickelten FE-Modell denkbar, sodass sowohl prozessseitige als auch anlagenseitige Einflüsse simuliert werden können. Zur gesamtheitlichen Optimierung können zukünftige Arbeiten zudem das gekoppelte Anlagen- und Prozessmodell auch in höher integrierte, verkettete Modelle der Batteriezellfertigung implementieren, wie sie beispielsweise in (Lombardo & Caro et al. 2022; Ventura Silva & Thomitzek et al. 2023) gezeigt werden. Die dazu erforderlichen geringen Rechenzeiten können durch Metamodelle realisiert werden, die aus rechenintensiveren Anlagen- und Prozessmodellen abgeleitet werden.

Zusammenfassend können die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Ergebnisse sowie deren mögliche Weiterführung wesentlich dazu beitragen, sowohl die Stapelbildung im Detail als auch die prozessübergreifenden Wirkzusammenhänge besser zu verstehen und so ganzheitlich die Optimierung der Batteriezellfertigung voranzubringen.

Publikationsliste des Autors

- Fleischer, J.; Fraider, F.; Kößler, F.; Mayer, D. & Wirth, F. (2022), „Agile Production Systems for Electric Mobility“. *55th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2022. Leading Manufacturing Systems Transformation*. Procedia CIRP Volume 107, Hrsg. E. Carpanzano, C. Boër & A. Valente. 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 29.06.-01.07.2022. Lugano, Schweiz, Elsevier, Amsterdam, S. 1251–1256. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.140>.
- Henschel, S.; Otte, S.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2023), „Use Cases for Digital Twins in Battery Cell Manufacturing“. *Production at the Leading Edge of Technology. Proceedings of the 12th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*. Hrsg. M. Liewald, A. Verl, T. Bauernhansl & H.-C. Möhring. 12th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP). 11.-14.10.2022. Stuttgart, Deutschland, S. 833–842. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18318-8_82.
- Henschel, S.; Schmidgruber, N.; Schabel, S.; Kößler, F.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2024), „Cost Modell for Agile Battery Cell Manufacturing“, *2024 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS)*, 2024 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS), 05.-06.06.2024. Bamberg, Deutschland, IEEE, Piscataway, S. 1–6. <https://doi.org/10.1109/EPTS61482.2024.10586719>.
- Husseini, K.; Schmidgruber, N.; Henschel, S.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2023), „Model-Based Optimization of Web Tension Control for the Flexible Cell Stack Assembly of Lithium-Ion Battery Cells“, *Energy Technology*, 11 (5), 2200679. <https://doi.org/10.1002/ente.202200679>.
- Kößler, F.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2022), „Agile Produktionssysteme in der Batteriezellfertigung“, *wt Werkstattstechnik online*, 112 (07-08), S. 492–495. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-07-08-46>.
- Mayer, D. & Fleischer, J. (2021), „Concept for modelling the influence of electrode corrugation after calendaring on stacking accuracy in battery cell production“. *54th CIRP Conference on Manufacturing Systems (54th CIRP CMS 2021). "Towards Digitalized Manufacturing 4.0"*. Procedia CIRP Volume 104, Hrsg. D. Mourtzis. CIRP CMS 2021 - 54th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 22.-

24.09.2021. Patras, Griechenland, Elsevier, Amsterdam, S. 744–749.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.125>.

Mayer, D.; Hausmann, L.; Maul, N.; Reinschmidt, L.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Systematic Investigation of the Grooving Process and its Influence on Slot Insulation of Stators with Hairpin Technology“. *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. 2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 03.-04.12.2019. Esslingen, Deutschland, IEEE, Piscataway, S. 1–7. <https://doi.org/10.1109/EDPC48408.2019.9011935>.

Mayer, D.; Maier, T. & Fleischer, J. (2023), „Simulation of the stacking process in battery cell manufacturing“. *56th CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2023*. Procedia CIRP Volume 120, Hrsg. K. Mpopu, N. Sacks & O. Damm. 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 24.-26.10.2023. Kapstadt, Südafrika, Elsevier, Amsterdam, S. 1393–1397.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.182>.

Mayer, D.; Schwab, B. & Fleischer, J. (2023), „Influence of Electrode Corrugation after Calendering on the Geometry of Single Electrode Sheets in Battery Cell Production“, *Energy Technology*, 11 (5), 2200870.
<https://doi.org/10.1002/ente.202200870>.

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), 2009, S. 1–16.
<https://doi.org/10.3390/pr9112009>.

Mehner, M.; Matkovic, N.; Mühlbeier, E.; Mayer, D.; Fleischer, J. & Verl, A. (2023), „Evaluation of external control of KUKA Industrial Robots for laboratory and prototype environments“, *ISR Europe 2023: 56th International Symposium on Robotics*. Hrsg. A. Verl & W. Kraus. 56th International Symposium on Robotics, 26.-27.09.2023. Stuttgart, Deutschland, VDE Verlag, Berlin, S. 278–284.
ISBN: 978-3-8007-6140-1

Otte, S.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2023), „Digitaler Zwilling zur Steuerungscodevalidierung. Kontinuierliches Mischen in der Batteriezellproduktion“, *wt Werkstattstechnik online*, 113 (07-08), S. 272–277. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-07-08-6>

- Schaible, P.; Kuster, H.; Rombach, D.; Beha, H.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2023), „Production and Torsion Testing of Rotationally Molded Hybrid Compositated Drive Shafts”, SAMPE Europe Conference & Exhibition 2023 Madrid, Hrsg. R. de Ruitjer. SAMPE Europe 23 Conference. 03.-05.10.2023. Madrid, Spanien, SAMPE Europe, Heerenveen, S. 650–658. ISBN: 979-8-3313-2173-4
- Schäfer, J.; Weinmann, H. W.; Mayer, D.; Storz, T.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2020), „Synergien zwischen Batterie- und Brennstoffzellen. Potenzialbewertung anhand von Struktur- und Maschinenparametern in der Fertigung“, *wt Werkstattstechnik online*, 110 (10), S. 735–741. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2020-10-91>.
- Schmidgruber, N.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2022), „Hochproduktive, hydraulische Batteriezellfertigung: Konzept zur hochproduktiven Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien durch hydraulische Pressen“, *wt Werkstattstechnik online*, 112 (9), S. 586–590. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-09-58>.
- Ventura Silva, G.; Thomitzek, M.; Lippke, M.; Heckmann, T.; Karaki, H.; Lischka, C.; Möhlen, F.; Mayer, D.; Hagemeister, J.; Daub, R.; Fleischer, J.; Nirschl, H.; Schröder, D.; Scharfer, P.; Schabel, W.; Kwade, A. & Herrmann, C. (2023), „Digitalization Platform for Sustainable Battery Cell Production: Coupling of Process, Production, and Product Models“, *Energy Technology*, 11 (5), 2200801. <https://doi.org/10.1002/ente.202200801>.
- Wirth, F.; Hausmann, L.; Halwas, M.; Hofmann, J.; Mayer, D.; Wößner, W. & Fleischer, J. (2019), „Optimierte Fertigung elektrischer Traktionsmotoren durch Technologien der Industrie 4.0“. *Future Mobility: automatisiert - vernetzt - elektrisch*. Hrsg. Technische Akademie Esslingen e.V. Kolloquium Future Mobility (2019). 02.07.2019. Ostfildern, Deutschland, Technische Akademie Esslingen (TAE), Ostfildern, S. 1–14.
- Wurba, A.-K.; Klemens, J.; Mayer, D.; Reusch, C.; Altmann, L.; Leonet, O.; Blázquez, J. A.; Boyano, I.; Ayerbe, E.; Scharfer, P.; Schabel, W. & Fleischer, J. (2023), „Methodology for the characterization and understanding of longitudinal wrinkling during calendaring of lithium-ion and sodium-ion battery electrodes“. *56th CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2023*. Procedia CIRP Volume

120, Hrsg. K. Mpofu, N. Sacks & O. Damm. 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 24.-26.10.2023. Kapstadt, Südafrika, Elsevier, Amsterdam, S. 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.056>.

Literaturverzeichnis

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

A_Freyd 2022

Freyd, N. (2022), *Experimentelle Untersuchung der Stapelgenauigkeit in verketteten Produktionsprozessen der Batteriezellfertigung*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland, wbk Institut für Produktionstechnik. Angeleitet durch Dominik Mayer.

A_Fuchs 2023

Fuchs, C. (2023), *Einflussfaktoren auf die Stapelgenauigkeit von Batteriezellen. Experimentelle Identifikation signifikanter Parameter und simulative Bestimmung von Materialparametern*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland, wbk Institut für Produktionstechnik. Angeleitet durch Dominik Mayer.

A_Kaiser 2022

Kaiser, D. (2022), *Konstruktion eines Versuchsstands zur Untersuchung der Prozess-Struktur-Wechselwirkungen beim Einzelblattstapeln*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland, wbk Institut für Produktionstechnik. Angeleitet durch Dominik Mayer.

A_Könn 2022

Könn, L. (2022), *Analyse der Parametereinflüsse auf die Stapelgenauigkeit im Kontext der Batteriezellfertigung*. Seminararbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland, wbk Institut für Produktionstechnik. Angeleitet durch Dominik Mayer.

A_Maier 2022

Maier, T. (2022), *Entwicklung eines verketteten FEM Simulationsmodells zur Vorhersage der Stapelgenauigkeit in der Batteriezellfertigung*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland, wbk Institut für Produktionstechnik. Angeleitet durch Dominik Mayer.

A_Schwab 2022

Schwab, B. (2022), *Experimentelle Untersuchung von Prozessschwankungen in*

verketteten Produktionsprozessen in der Batteriezellfertigung. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland, wbk Institut für Produktionstechnik. Angeleitet durch Dominik Mayer.

A_Wang 2021

Wang, Y. (2021), *Development of an AI-Based Modeling Method for Stacking Accuracy Prediction in Lithium-Ion Battery Cell Production*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland, wbk Institut für Produktionstechnik. Angeleitet durch Dominik Mayer.

Abollahifar & Cavers et al. 2023

Abollahifar, M.; Cavers, H.; Scheffler, S.; Diener, A.; Lippke, M. & Kwade, A. (2023), „Insights into Influencing Electrode Calendering on the Battery Performance“, *Advanced Energy Materials*, 13 (40), 2300973, S. 1–34.
<https://doi.org/10.1002/aenm.202300973>.

Ahn 2024

Ahn, Y. J. (2024), „Calibration of Crushable Foam Models for the Jellyroll of Cylindrical Lithium-Ion Batteries“, *Energies*, 17 (6), 1360, S. 1–12.
<https://doi.org/10.3390/en17061360>.

Ali & Lai et al. 2013

Ali, M. Y.; Lai, W.-J. & Pan, J. (2013), „Computational models for simulations of lithium-ion battery cells under constrained compression tests“, *Journal of Power Sources*, 242 , S. 325–340. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.022>.

Amici & Asinari et al. 2022

Amici, J.; Asinari, P.; Ayerbe, E.; Barboux, P.; Bayle-Guillemaud, P.; Behm, R. J.; Berecibar, M.; Berg, E.; Bhowmik, A.; Bodoardo, S.; Castelli, I. E.; Cekic-Laskovic, I.; Christensen, R.; Clark, S.; Diehm, R.; Dominko, R.; Fichtner, M.; Franco, A. A.; Grimaud, A.; Guillet, N.; Hahlin, M.; Hartmann, S.; Heiries, V.; Hermansson, K.; Heuer, A.; Jana, S.; Jabbour, L.; Kallo, J.; Latz, A.; Lormann, H.; Løvvik, O. M.; Lyonnard, S.; Meeus, M.; Paillard, E.; Perraud, S.; Placke, T.; Punckt, C.; Raccurt, O.; Ruhland, J.; Sheridan, E.; Stein, H.; Tarascon, J.-M.; Trapp, V.; Vegge, T.; Weil, M.; Wenzel, W.; Winter, M.; Wolf, A. & Edström, K. (2022), „A Roadmap for Transforming Research to Invent the Batteries of the Future Designed within the

European Large Scale Research Initiative BATTERY 2030+“, *Advanced Energy Materials*, 12 (17), 2102785, S. 1–42. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102785>.

Angrosch & Zigo et al. 2016

Angrosch, B.; Zigo, M. & Gögele, C. (2016), „Simulation des Beulverhaltens von Automobilaußenblechen“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 118 (10), S. 58–61. <https://doi.org/10.1007/s35148-016-0106-1>.

Aydemir 2021

Aydemir, M. (2021), *Modellbasierte Prozessgrenzenermittlung in der Entwicklung und Inbetriebnahme von Hochdurchsatz-Batteriestapelverfahren*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin.

Bach 2017

Bach, G. (2017), *Beitrag zur Produktivitätssteigerung in der Massenherstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin.

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*, europäische Patentanmeldung EP 4 016 664 A1.

Bauer & Glock 2016

Bauer, H. & Glock, A. (2016), *Verfahren zur Herstellung einer Elektrodeneinheit für eine Batteriezelle und Elektrodeneinheit*, deutsche Patentanmeldung DE 10 2016 213 149 A1.

Baumeister 2017

Baumeister, M. (2017), *Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Shaker Verlag, Düren, ISBN: 978-3-8440-5512-2.

Baumeister & Fleischer 2014

Baumeister, M. & Fleischer, J. (2014), „Integrated cut and place module for high productive manufacturing of lithium-ion cells“, *CIRP Annals*, 63 (1), S. 5–8. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.063>.

Behrens & Nadi et al. 2009

Behrens, B.-A.; Nadi, T. E. & Krimm, R. (2009), „Richten von Rand- und Mittelwellen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 104 (6), S. 478–481.
<https://doi.org/10.3139/104.110094>.

Bender & Gericke 2021

Bender, B. & Gericke, K. (2021), „Entwickeln der Anforderungsbasis: Requirements Engineering“ in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, Hrsg. B. Bender & K. Gericke, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 169–209.

Berzi & Baldanzini et al. 2018

Berzi, L.; Baldanzini, N.; Barbani, D.; Delogu, M.; Sala, R. & Pierini, M. (2018), „Simulation of crash events for an electric four wheel vehicle“. *47th AIAS International Conference on Stress Analysis 2018*. Procedia Structural Integrity, Hrsg. D. Amodio, N. Bonora, L. Bruno, F. Frendo, F. Iacoviello & G. Mirone. AIAS 2018 International Conference on Stress Analysis. 05.-08.09.2018. Villa San Giovanni, Italien, Elsevier, Amsterdam, S. 249–264. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.090>.

Beuse & Fingerle et al. 2021

Beuse, T.; Fingerle, M.; Wagner, C.; Winter, M. & Börner, M. (2021), „Comprehensive Insights into the Porosity of Lithium-Ion Battery Electrodes: A Comparative Study on Positive Electrodes Based on $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ (NMC622)“, *Batteries*, 7 (4), 70, S. 1–24. <https://doi.org/10.3390/batteries7040070>.

Biberacher & Stolz et al. 2021

Biberacher, T.; Stolz, J.; Rathgeb, M. & Janusch, T. (2021), *Positionier- und Stapelvorrichtung, Stapelvorrichtung und Stapelverfahren für Wiederholkomponenten eines Zellstapels für Batterie- oder Brennstoffzellen*, europäische Patentanmeldung EP 4 152 452 A1.

Boeselager & Kapelar et al. 2021

Boeselager, C. von; Kapelar, M. O. & Dröder, K. (2021), „Multi-Body Simulation of a Novel Electrode Stacking Process for Lithium-Ion Battery Production“. *15th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME'21). Smart and Sustainable Production Technology and Systems*. Procedia CIRP Volume 112, Hrsg. R. Teti & D. D'Addona. 15th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. 14.-16.07.2021. Golf von Neapel,

Italien, Elsevier, Amsterdam, S. 519–524. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.092>.

Boeselager & Müller et al. 2023

Boeselager, C. von; Müller, A.; Tönjes, L.; Shi, X.; Wassenberg, D.; Evans, D.; Glodde, A.; Dietrich, F. & Dröder, K. (2023), „Model-Based Design and Experimental Evaluation of a High-Throughput Electrode Feeding and Stacking Process“, *Energy Technology*, 11 (5), 2200687. <https://doi.org/10.1002/ente.202200687>.

Boeselager & Vogt et al. 2024

Boeselager, C. von; Vogt, S.; Wacker, C. & Dröder, K. (2024), „Enhanced Deposition Accuracy for Battery Electrodes in a Novel High-Speed Stacking Process“. *10th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CIRP CATS 2024)*. Procedia CIRP Volume 127, Hrsg. J. Fleischer & J. Krüger. 10th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems. 24.-26.04.2024. Karlsruhe, Deutschland, Elsevier, Amsterdam, S. 86–91. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.07.016>.

Bold 2023

Bold, B. (2023), *Kompensation der wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden. Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Shaker Verlag, Düren, ISBN: 978-3-8440-9311-7.

Bold & Fleischer 2018

Bold, B. & Fleischer, J. (2018), „Kalandrieren von Elektroden für Li-Ionen-Batterien“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113 (9), S. 571–575. <https://doi.org/10.3139/104.111968>.

Bonatti & Mohr 2016

Bonatti, C. & Mohr, D. (2016), „Anisotropic viscoplasticity and fracture of fine grained metallic aluminum foil used in Li-ion batteries“, *Materials Science and Engineering: A*, 654, S. 329–343. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.048>.

Box & Hunter 1961

Box, G. E. P. & Hunter, J. S. (1961), „The 2^k — p Fractional Factorial Designs“, *Technometrics*, 3 (3), S. 311–351. <https://doi.org/10.1080/00401706.1961.10489951>.

Brochu & Cora et al. 2010

Brochu, E.; Cora, V. M. & Freitas, N. de (2010), *A Tutorial on Bayesian Optimization of Expensive Cost Functions, with Application to Active User Modeling and Hierarchical Reinforcement Learning*. <https://arxiv.org/pdf/1012.2599>.

Brüggemann & Bremer 2020

Brüggemann, H. & Bremer, P. (2020), *Grundlagen Qualitätsmanagement*, 3. Aufl., Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-28779-5.

Bürgel & Richard et al. 2014

Bürgel, R.; Richard, H. A. & Riemer, A. (2014), *Werkstoffmechanik. Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen*, 2. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-03935-6.

Bytheway 2007

Bytheway, C. W. (2007), *FAST creativity & innovation. Rapidly improving processes, product development and solving complex problems*, J. Ross Publishing, Fort Lauderdale. ISBN: 978-1-932159-66-0.

Cheng & Hong et al. 2017

Cheng, E. J.; Hong, K.; Taylor, N. J.; Choe, H.; Wolfenstine, J. & Sakamoto, J. (2017), „Mechanical and physical properties of $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ (NMC)“, *Journal of the European Ceramic Society*, 37 (9), S. 3213–3217. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.03.048>.

Crippa & Guizzardi et al. 2023

Crippa, M.; Guizzardi, D.; Schaaf, E.; Monforti-Ferrario, F.; Quadrelli, R.; Riskey Martin, A.; Rossi, S.; Vignati, E.; Muntean, M.; Brandao De Melo, J.; Oom, D.; Paganini, F.; Banja, M.; Taghavi-Moharamli, P.; Köykkä, J.; Grassi, G.; Branco, A. & San-Miguel, J. (2023), *GHG emissions of all world countries. 2023*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN: 978-92-68-07550-0.

Diener & Ivanov et al. 2022

Diener, A.; Ivanov, S.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2022), „Evaluation of Deformation Behavior and Fast Elastic Recovery of Lithium-Ion Battery Cathodes via Direct Roll-Gap Detection During Calendering“, *Energy Technology*, 10 (4), 2101033. <https://doi.org/10.1002/ente.202101033>.

DIN EN ISO 527-1

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2019), *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019)*, DIN EN ISO 527-1:2019-12, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 6892-1

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2020), *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019)*, DIN EN ISO 6892-1:2020-06, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 7438

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2021), *Metallische Werkstoffe – Biegeversuch (ISO 7438:2020)*, DIN EN ISO 7438:2021-03, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 50154

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2019), *Zugversuch an Folien und Bändern aus Aluminium und Aluminium-Knetlegierungen mit einer Nenndicke kleiner 0,200 mm*, DIN 50154:2019-09, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 53121

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2014), *Prüfung von Papier, Karton und Pappe – Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode*, DIN 53121:2014-08, Beuth Verlag, Berlin.

Doppelbauer 2020

Doppelbauer, M. (2020), *Grundlagen der Elektromobilität. Technik, Praxis, Energie und Umwelt*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-29729-9.

Dyckhoff & Spengler 2010

Dyckhoff, H. & Spengler, T. S. (2010), *Produktionswirtschaft*, 3. Aufl., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-13683-2.

Fleischer & Fraider et al. 2022

Fleischer, J.; Fraider, F.; Kößler, F.; Mayer, D. & Wirth, F. (2022), „Agile Production Systems for Electric Mobility“. *55th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2022. Leading Manufacturing Systems Transformation*. Procedia CIRP Volume 107, Hrsg. E. Carpanzano, C. Boër & A. Valente. 55th CIRP Conference on

Manufacturing Systems. 29.06.-01.07.2022. Lugano, Schweiz, Elsevier, Amsterdam, S. 1251–1256. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.140>.

Fröhlich & Leithoff et al. 2018

Fröhlich, A.; Leithoff, R.; Boeselager, C. von; Dröder, K. & Dietrich, F. (2018), „Investigation of particulate emissions during handling of electrodes in lithium-ion battery assembly“. *6th CIRP Global Web Conference (CIRPe 2018). Envisaging the Future Manufacturing, Design, Technologies and Systems in Innovation Era*, Hrsg. A. Simeone & P. C. Priarone. 6th CIRP Global Web Conference. 23.-25.10.2018. Online, Elsevier, Amsterdam, S. 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.322>.

Gandert & Mühlport et al. 2024

Gandert, J. C.; Mühlport, R.; Müller-Welt, P.; Schall, D.; Schmidt, A.; Schuhmann, S.; Seegert, P.; Weber, N.; Zeng, Y.; Wetzels, T. & Paarmann, S. (2024), „Methodology for the Holistic Design of Format-Flexible Lithium-Ion Battery Systems“, *International Journal of Energy Research*, 2024 (1), 2125023, S. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2024/2125023>.

Gericke & Bender et al. 2021

Gericke, K.; Bender, B.; Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2021), „Funktionen und deren Strukturen“ in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, Hrsg. B. Bender & K. Gericke, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 233–254.

GOM mbH 2013

GOM mbH (2013), *ATOS Core. Benutzerhandbuch - Hardware*.

Grabow & Klink et al. 2023

Grabow, J.; Klink, J.; Bengler, R.; Hauer, I. & Beck, H.-P. (2023), „Particle Contamination in Commercial Lithium-Ion Cells—Risk Assessment with Focus on Internal Short Circuits and Replication by Currently Discussed Trigger Methods“, *Batteries*, 9 (1), 9, S. 1–22. <https://doi.org/10.3390/batteries9010009>.

Graf 2018

Graf, C. (2018), „Cathode materials for lithium-ion batteries“ in *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Hrsg. R. Korthauer, Springer, Berlin, S. 29–41.

Gross & Hauger et al. 2023

Gross, D.; Hauger, W. & Wriggers, P. (2023), *Technische Mechanik 4. Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*, 11. Aufl., Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-66524-4.

Günter & Wassiliadis 2022

Günter, F. J. & Wassiliadis, N. (2022), „State of the Art of Lithium-Ion Pouch Cells in Automotive Applications: Cell Teardown and Characterization“, *Journal of The Electrochemical Society*, 169 (3), 030515. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac4e11>.

Günther 2023

Günther, T. (2023), *Untersuchungen zu Fehlern beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Elektroden*. Dissertation, Technische Universität München, München.

Günther & Schreiner et al. 2019

Günther, T.; Schreiner, D.; Metkar, A.; Meyer, C.; Kwade, A. & Reinhart, G. (2019), „Classification of Calendering-Induced Electrode Defects and Their Influence on Subsequent Processes of Lithium-Ion Battery Production“, *Energy Technology*, 8 (2), 1900026. <https://doi.org/10.1002/ente.201900026>.

Gupta & Üçel et al. 2020

Gupta, P.; Üçel, İ. B.; Gudmundson, P. & Olsson, E. (2020), „Characterization of the Constitutive Behavior of a Cathode Active Layer in Lithium-Ion Batteries Using a Bending Test Method“, *Experimental Mechanics*, 60 , S. 847–860. <https://doi.org/10.1007/s11340-020-00613-5>.

Haselrieder 2017

Haselrieder, W. (2017), *Kalandrierung zur gezielten Einstellung der Batterieelektroden-Performance*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, Sierke Verlag, Göttingen, ISBN: 978-3-86844-942-6.

Heck & Huttner et al. 2023

Heck, C. A.; Huttner, F.; Mayer, J. K.; Fromm, O.; Börner, M.; Heckmann, T.; Scharfer, P.; Schabel, W.; Winter, M. & Kwade, A. (2023), „Production of Nickel-Rich Cathodes for Lithium-Ion Batteries from Lab to Pilot Scale under Investigation of the Process Atmosphere“, *Energy Technology*, 11 (5), 2200945. <https://doi.org/10.1002/ente.202200945>.

Heimes & Dorn et al. 2024

Heimes, H. H.; Dorn, B.; Locke, M.; Wennemar, S.; Ludwigs, R.; Plocher, L. & Voß, S. (2024), „Produktionsverfahren von Batteriezellen und -systemen“ in *Elektromobilität. Grundlagen einer Fortschrittstechnologie*, Hrsg. A. Kampker & H. H. Heimes, Springer Vieweg, Berlin, S. 259–273.

Heimes & Kampker et al. 2024

Heimes, H. H.; Kampker, A.; Offermanns, C.; Vienenkötter, J.; Frank, M.; Robben, T.; Klohs, D.; Cattani, N. S.; Lackner, N.; Christen, N.; Kreisköther, K.; Deutskens, C.; Kreisköther, K. & Fluchs, S. (2024), „Elektromobilität als Schlüsseltechnologie der Mobilitätswende“ in *Elektromobilität. Grundlagen einer Fortschrittstechnologie*, Hrsg. A. Kampker & H. H. Heimes, Springer Vieweg, Berlin, S. 39–62.

Henschel & Kößler et al. 2024

Henschel, S.; Kößler, F. & Fleischer, J. (2024), „Material Flow of an Agile Battery Cell Production System Based on Diffusion-Tight Transport Boxes and Driverless Transport Systems“. *Production at the Leading Edge of Technology. Proceedings of the 13th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*, Hrsg. T. Bauernhansl, A. Verl, M. Liewald & H.-C. Möhring. 13th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP). 20.-23.11.2023. Freudenstadt, Deutschland, Springer, Cham, S. 550–558. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47394-4_53.

Heubner & Voigt et al. 2021

Heubner, C.; Voigt, K.; Marcinkowski, P.; Reuber, S.; Nikolowski, K.; Schneider, M.; Partsch, M. & Michaelis, A. (2021), „From Active Materials to Battery Cells: A Straightforward Tool to Determine Performance Metrics and Support Developments at an Application-Relevant Level“, *Advanced Energy Materials*, 11 (46), 2102647, S. 1–10. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102647>.

Hirai & Yamaura 2013

Hirai, K. & Yamaura, S. (2013), *Lamination System*, europäische Patentanmeldung EP 2 717 374 A1.

Houache & Yim et al. 2022

Houache, M.; Yim, C.-H.; Karkar, Z. & Abu-Lebdeh, Y. (2022), „On the Current and Future Outlook of Battery Chemistries for Electric Vehicles—Mini Review“, *Batteries*, 8 (7), 70, S. 1–19. <https://doi.org/10.3390/batteries8070070>.

Husseini & Boschert et al. 2024

Husseini, K.; Boschert, L.; Schabel, S. & Fleischer, J. (2024), „Modeling machine-side influences on the Z-Folding process of battery cells“, *Production Engineering*, 18 , S. 615–623. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01248-w>.

Husseini & Schmidgruber et al. 2023

Husseini, K.; Schmidgruber, N.; Henschel, S.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2023), „Model-Based Optimization of Web Tension Control for the Flexible Cell Stack Assembly of Lithium-Ion Battery Cells“, *Energy Technology*, 11 (5), 2200679. <https://doi.org/10.1002/ente.202200679>.

Husseini & Schmidgruber et al. 2022

Husseini, K.; Schmidgruber, N.; Weinmann, H. W.; Maibaum, K.; Ruhland, J. & Fleischer, J. (2022), „Development of a Digital Twin for Improved Ramp-Up Processes in the Context of Li-Ion-Battery-Cell-Stack-Formation“. *9th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS 2022)*. Procedia CIRP Volume 106, Hrsg. K. Kellens & E. Demeester. 9th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems. 06.-08.04.2022. Leuven, Belgien, Elsevier, Amsterdam, S. 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.150>.

Jansen & Kandula et al. 2020

Jansen, T.; Kandula, M.; Blass, D.; Hartwig, S.; Haselrieder, W. & Dilger, K. (2020), „Evaluation of the Separation Process for the Production of Electrode Sheets“, *Energy Technology*, 8 (2), 1900519. <https://doi.org/10.1002/ente.201900519>.

Jones & Nachtsheim 2011

Jones, B. & Nachtsheim, C. J. (2011), „A Class of Three-Level Designs for Definitive Screening in the Presence of Second-Order Effects“, *Journal of Quality Technology*, 43 (1), S. 1–15. <https://doi.org/10.1080/00224065.2011.11917841>.

Jones & Nachtsheim 2013

Jones, B. & Nachtsheim, C. J. (2013), „Definitive Screening Designs with Added Two-Level Categorical Factors“, *Journal of Quality Technology*, 45 (2), S. 121–129. <https://doi.org/10.1080/00224065.2013.11917921>.

Kaden & Schlüter et al. 2021

Kaden, N.; Schlüter, N.; Leithoff, R.; Savas, S.; Grundmeier, S. & Dröder, K. (2021), „Influence of the Lamination Process on the Wetting Behavior and the

Wetting Rate of Lithium-Ion Batteries“, *Processes*, 9 (10), 1851, S. 1–17.
<https://doi.org/10.3390/pr9101851>.

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), „Process and Product Development of Electrodes for Lithium-Ion Cells“, *Chemie Ingenieur Technik*, 86 (5), S. 695–706. <https://doi.org/10.1002/cite.201300085>.

Kampker & Heimes et al. 2023

Kampker, A.; Heimes, H.; Dorn, B.; Clever, H. & Scheibe, A. (2023), „Potentials and Implementation Strategies For Flexible Battery Cell Production“. *CPSL 2023. Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics*, Hrsg. D. Herberger, M. Hübner & V. Stich. Conference on Production Systems and Logistics 2023. 28.02.-02.03.2023. Querétaro, Mexico, publish-Ing., Offenburg, S. 874–883. <https://doi.org/10.15488/13506>.

Kermani & Sahraei 2017

Kermani, G. & Sahraei, E. (2017), „Review: Characterization and Modeling of the Mechanical Properties of Lithium-Ion Batteries“, *Energies*, 10 (11), 1730, S. 1–25. <https://doi.org/10.3390/en10111730>.

Ketterer & Karl et al. 2009

Ketterer, B.; Karl, U.; Möst, D. & Ulrich, S. (2009), *Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotential in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen*. Forschungsbericht FZKA-7503, Institut für Materialforschung I, Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/270081162>.

Kirchner 2020

Kirchner, E. (2020), *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung. Von der Idee zum erfolgreichen Produkt*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-61762-5.

Klemens & Wurba et al. 2023

Klemens, J.; Wurba, A.-K.; Burger, D.; Müller, M.; Bauer, W.; Büchele, S.; Leonet, O.; Blázquez, J. A.; Boyano, I.; Ayerbe, E.; Ehrenberg, H.; Fleischer, J.; Smith, A.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2023), „Challenges and Opportunities for Large-Scale Electrode Processing for Sodium-Ion and Lithium-Ion Battery“, *Batteries & Supercaps*, 6 (11), e202300291, S. 1–14. <https://doi.org/10.1002/batt.202300291>.

Knehr & Kubal et al. 2024

Knehr, K. W.; Kubal, J. J.; Yoon, S.; Jeon, H.; Roh, W. J. & Ahmed, S. (2024), „Energy consumption of lithium-ion pouch cell manufacturing plants“, *Journal of Cleaner Production*, 468 , 143050, S. 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143050>.

Kollenda & Hussein et al. 2023

Kollenda, A.; Hussein, K.; Henschel, S.; Schmidgruber, N.; Becker-Koch, D.; Braunwarth, W.; Fleischer, J. & Daub, R. (2023), „Quality Assurance for Flexible Stack Assembly of Lithium-Ion Cells“, *Energy Technology*, 11 (5), 2201059.
<https://doi.org/10.1002/ente.202201059>.

Korthauer 2018

Korthauer, R. (Hrsg.) (2018), *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Springer, Berlin. ISBN: 978-3-662-53069-6.

Kriegler & Binzer et al. 2021

Kriegler, J.; Binzer, M. & Zaeh, M. F. (2021), „Process strategies for laser cutting of electrodes in lithium-ion battery production“, *Journal of Laser Applications*, 33 (1), 012006. <https://doi.org/10.2351/7.0000335>.

Kulkarni & Vysoudil et al. 2021

Kulkarni, S. S.; Vysoudil, F. & Vietor, T. (2021), „Evaluation of Modelling and Simulation Strategies to Investigate the Mechanical Integrity of a Battery Cell Using Finite Element Methods“, *Energies*, 14 (11), 2976, S. 1–18.
<https://doi.org/10.3390/en14112976>.

Kurfer & Westermeier et al. 2012

Kurfer, J.; Westermeier, M.; Tammer, C. & Reinhart, G. (2012), „Production of large-area lithium-ion cells – Preconditioning, cell stacking and quality assurance“, *CIRP Annals*, 61 (1), S. 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.101>.

Kurzweil 2018

Kurzweil, P. (2018), „Lithiumionen-Batterien“ in *Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*, Hrsg. P. Kurzweil & O. K. Dietlmeier, Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 165–263.

Kwade & Haselrieder et al. 2018

Kwade, A.; Haselrieder, W.; Leithoff, R.; Modlinger, A.; Dietrich, F. & Droeder, K. (2018), „Current status and challenges for automotive battery production technologies“, *Nature Energy*, 3 , S. 290–300. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0130-3>.

Lai & Ali et al. 2014

Lai, W.-J.; Ali, M. Y. & Pan, J. (2014), „Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery cells under compressive loading conditions“, *Journal of Power Sources*, 245 , S. 609–623.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.134>.

Lee & Kim 2020

Lee, D.-C. & Kim, C.-W. (2020), „Detailed Layered Nonlinear Finite Element Analysis for Lithium-Ion Battery Cells to Predict Internal Short Circuits Due to Separator Fractures under Hemisphere Indentation“, *Journal of The Electrochemical Society*, 167 (12), 120511. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abaa19>.

Leithoff & Dilger et al. 2021

Leithoff, R.; Dilger, N.; Duckhorn, F.; Blume, S.; Lembcke, D.; Tschöpe, C.; Herrmann, C. & Dröder, K. (2021), „Inline Monitoring of Battery Electrode Lamination Processes Based on Acoustic Measurements“, *Batteries*, 7 (1), 19, S. 1–21.
<https://doi.org/10.3390/batteries7010019>.

Leithoff & Fröhlich et al. 2020

Leithoff, R.; Fröhlich, A. & Dröder, K. (2020), „Investigation of the Influence of Deposition Accuracy of Electrodes on the Electrochemical Properties of Lithium-Ion Batteries“, *Energy Technology*, 8 (2), 1900129.
<https://doi.org/10.1002/ente.201900129>.

Leithoff & Fröhlich et al. 2022

Leithoff, R.; Fröhlich, A.; Masuch, S.; Ventura Silva, G. & Dröder, K. (2022), „Process-Product Interdependencies in Lamination of Electrodes and Separators for Lithium-Ion Batteries“, *Energies*, 15 (7), 2670, S. 1–17.
<https://doi.org/10.3390/en15072670>.

Leuthner 2018

Leuthner, S. (2018), „Lithium-ion battery overview“ in *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Hrsg. R. Korthauer, Springer, Berlin, S. 13–19.

Li & Xing et al. 2022

Li, W.; Xing, B.; Watkins, T. R.; Xia, Y.; Wang, H. & Zhu, J. (2022), „Damage of prismatic lithium-ion cells subject to bending: Test, model, and detection“, *EcoMat*, 4 (6), e12257, S. 1–16. <https://doi.org/10.1002/eom2.12257>.

Link & Neef et al. 2023

Link, S.; Neef, C. & Wicke, T. (2023), „Trends in Automotive Battery Cell Design: A Statistical Analysis of Empirical Data“, *Batteries*, 9 (5), 261, S. 1–23. <https://doi.org/10.3390/batteries9050261>.

Lombardo & Caro et al. 2022

Lombardo, T.; Caro, F.; Ngandjong, A. C.; Hooek, J.-B.; Duquesnoy, M.; Delepine, J. C.; Ponchelet, A.; Doison, S. & Franco, A. A. (2022), „The ARTISTIC Online Calculator: Exploring the Impact of Lithium-Ion Battery Electrode Manufacturing Parameters Interactively Through Your Browser“, *Batteries & Supercaps*, 5 (3), e202100324, S. 1–9. <https://doi.org/10.1002/batt.202100324>.

Ma & Schabel et al. 2023

Ma, L.; Schabel, S. & Fleischer, J. (2023), „Schneiden von Batterie- und Brennstoffzellenkomponenten. Synergien aus produktionstechnischer Sicht“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 118 (9), S. 561–566. <https://doi.org/10.1515/zwf-2023-1126>.

Mayer & Fleischer 2021

Mayer, D. & Fleischer, J. (2021), „Concept for modelling the influence of electrode corrugation after calendaring on stacking accuracy in battery cell production“. *54th CIRP Conference on Manufacturing Systems (54th CIRP CMS 2021)*. "Towards Digitalized Manufacturing 4.0". Procedia CIRP Volume 104, Hrsg. D. Mourtzis. CIRP CMS 2021 - 54th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 22.-24.09.2021. Patras, Griechenland, Elsevier, Amsterdam, S. 744–749. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.125>.

Mayer & Maier et al. 2023

Mayer, D.; Maier, T. & Fleischer, J. (2023), „Simulation of the stacking process in battery cell manufacturing“. *56th CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2023*. Procedia CIRP Volume 120, Hrsg. K. Mpofu, N. Sacks & O. Damm. 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 24.-26.10.2023.

Kapstadt, Südafrika, Elsevier, Amsterdam, S. 1393–1397.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.182>.

Mayer & Schwab et al. 2023

Mayer, D.; Schwab, B. & Fleischer, J. (2023), „Influence of Electrode Corrugation after Calendering on the Geometry of Single Electrode Sheets in Battery Cell Production“, *Energy Technology*, 11 (5), 2200870.
<https://doi.org/10.1002/ente.202200870>.

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), 2009, S. 1–16.
<https://doi.org/10.3390/pr9112009>.

Mayr & Schreiner et al. 2022

Mayr, A.; Schreiner, D.; Stumper, B. & Daub, R. (2022), „In-line Sensor-based Process Control of the Calendering Process for Lithium-Ion Batteries“. *55th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2022. Leading Manufacturing Systems Transformation*. Procedia CIRP Volume 107, Hrsg. E. Carpanzano, C. Boër & A. Valente. 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 29.06.-01.07.2022. Lugano, Schweiz, Elsevier, Amsterdam, S. 295–301. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.048>.

Meyer 2019

Meyer, C. (2019), *Prozessmodellierung der Kalandrierung von Lithium-Ionen-Batterie-Elektroden*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, Sierke Verlag, Göttingen, ISBN: 978-3-96548-043-8.

Michaelis & Schütrumpf et al. 2023

Michaelis, S.; Schütrumpf, J.; Kampker, A.; Heimes, H.; Dorn, B.; Wennemar, S.; Scheibe, A.; Wolf, S.; Smulka, M.; Ingendoh, B.; Thielmann, A.; Neef, C.; Wicke, T.; Weymann, L.; Hettesheimer, T.; Kwade, A.; Gottschalk, L.; von Boeselager, C.; Blömeke, S.; Diener, A.; Horstig, M.-W. von; Husmann, J.; Kouli, M.; Mund, M.; Ventura Silva, G.; Weber, M.; Podbreznik, M. & Schmetz, A. (2023), *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2023*, VDMA Verlag, Frankfurt am Main.

Miranda & Gonçalves et al. 2023

Miranda, D.; Gonçalves, R.; Wuttke, S.; Costa, C. M. & Lanceros-Méndez, S.

- (2023), „Overview on Theoretical Simulations of Lithium-Ion Batteries and Their Application to Battery Separators“, *Advanced Energy Materials*, 13 (13), 2203874. <https://doi.org/10.1002/aenm.202203874>.
- Miyazaki & Yamaura 2013
Miyazaki, T. & Yamaura, S. (2013), *Apparatus and method for manufacturing a stacked electrode*, US-amerikanische Patentanmeldung US 2014/0059855 A1.
- Moeller 2018
Moeller, K.-C. (2018), „Overview of battery systems“ in *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Hrsg. R. Korthauer, Springer, Berlin, S. 3–10.
- Mooy 2019
Mooy, R. (2019), *Beitrag zur Produktivitätssteigerung in der Vereinzelung, Positionierung und Orientierung von Elektrodenfolien durch eine kontinuierliche Materialbewegung*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin.
- Müller & Aydemir et al. 2021
Müller, A.; Aydemir, M.; Boeselager, C. von; van Ohlen, N.; Rahlfs, S.; Leithoff, R.; Dröder, K. & Dietrich, F. (2021), „Simulation Based Approach for High-Throughput Stacking Processes in Battery Production“, *Processes*, 9 (11), 1993. <https://doi.org/10.3390/pr9111993>.
- Müller-Welt & Bause et al. 2023
Müller-Welt, P.; Bause, K. & Albers, A. (2023), „Battery System Optimization Using Format Flexible Pouch Cells – Literature Review and Research Methodology“. *33rd CIRP Design Conference 2023*. Procedia CIRP Volume 119, Hrsg. A. Liu & S. Kara. 33rd CIRP Design Conference. 17.-19.03.2023. Sydney, Australien, Elsevier, Amsterdam, S. 1078–1083. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.181>.
- Muresanu & Dudescu 2022
Muresanu, A. D. & Dudescu, M. C. (2022), „Numerical and Experimental Evaluation of a Battery Cell under Impact Load“, *Batteries*, 8 (5), 48. <https://doi.org/10.3390/batteries8050048>.
- Oliver & Pharr 2004
Oliver, W. C. & Pharr, G. M. (2004), „Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to

methodology“, *Journal of Materials Research*, 19 (1), S. 3–20.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>.

Örüm Aydın & Zajonz et al. 2023

Örüm Aydın, A.; Zajonz, F.; Günther, T.; Dermenci, K.; Berecibar, M. & Urrutia, L. (2023), „Lithium-Ion Battery Manufacturing: Industrial View on Processing Challenges, Possible Solutions and Recent Advances“, *Batteries*, 9 (11), 555.
<https://doi.org/10.3390/batteries9110555>.

Pan & Sedlatschek et al. 2020

Pan, Z.; Sedlatschek, T. & Xia, Y. (2020), „Effect of State-of-Charge and Air Exposure on Tensile Mechanical Properties of Lithium-Ion Battery Electrodes“, *Journal of The Electrochemical Society*, 167 (9), 090517. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab8804>.

Pan & Xiong et al. 2022

Pan, Y.; Xiong, Y.; Dai, W.; Diao, K.; Wu, L. & Wang, J. (2022), „Crush and crash analysis of an automotive battery-pack enclosure for lightweight design“, *International Journal of Crashworthiness*, 27 (2), S. 500–509.
<https://doi.org/10.1080/13588265.2020.1812253>.

Pettinger 2013

Pettinger, K.-H. (2013), „Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 221–235.

Pettinger & Kampker et al. 2018

Pettinger, K.-H.; Kampker, A.; Hohenthanner, C.-R.; Deutskens, C.; Heimes, H. & vom Hemdt, A. (2018), „Lithium-ion cell and battery production processes“ in *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Hrsg. R. Korthauer, Springer, Berlin, S. 211–226.

Ponn & Lindemann 2011

Ponn, J. & Lindemann, U. (2011), *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*, 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-20579-8.

Prorok 2022

Prorok, S. (2022), *Statistische Unsicherheit in der industriellen Produktion. Grundlagen und Methoden der modernen Qualitätssicherung*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-63889-7.

Rupnowski & Ulsh et al. 2018

Rupnowski, P.; Ulsh, M.; Sopori, B.; Green, B. G.; Wood, D. L.; Li, J. & Sheng, Y. (2018), „In-line monitoring of Li-ion battery electrode porosity and areal loading using active thermal scanning - modeling and initial experiment“, *Journal of Power Sources*, 375 , S. 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.084>.

Sahraei & Bosco et al. 2016

Sahraei, E.; Bosco, E.; Dixon, B. & Lai, B. (2016), „Microscale failure mechanisms leading to internal short circuit in Li-ion batteries under complex loading scenarios“, *Journal of Power Sources*, 319 , S. 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.005>.

Sahraei & Hill et al. 2012

Sahraei, E.; Hill, R. & Wierzbicki, T. (2012), „Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity“, *Journal of Power Sources*, 201 , S. 307–321. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.094>.

Samba & Omar et al. 2014

Samba, A.; Omar, N.; Gualous, H.; Capron, O.; van den Bossche, P. & van Mierlo, J. (2014), „Impact of Tab Location on Large Format Lithium-Ion Pouch Cell Based on Fully Coupled Tree-Dimensional Electrochemical-Thermal Modeling“, *Electrochimica Acta*, 147 , S. 319–329. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.08.115>.

Sandström 2024

Sandström, R. (2024), *Basic Modeling and Theory of Creep of Metallic Materials*, 1. Aufl., Springer, Cham. ISBN: 978-3-031-49507-6.

Sangrós Giménez & Finke et al. 2018

Sangrós Giménez, C.; Finke, B.; Nowak, C.; Schilde, C. & Kwade, A. (2018), „Structural and mechanical characterization of lithium-ion battery electrodes via DEM simulations“, *Advanced Powder Technology*, 29 (10), S. 2312–2321. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.05.014>.

Sauer & Ringbeck 2024

Sauer, D. U. & Ringbeck, F. (2024), „Batteriesysteme und deren Steuerung“ in *Elektromobilität. Grundlagen einer Fortschrittstechnologie*, Hrsg. A. Kampker & H. H. Heimes, Springer Vieweg, Berlin, S. 129–151.

SAUERESSIG GmbH + Co. KG 2013

SAUERESSIG GmbH + Co. KG (2013), *Betriebsanleitung GKL 500 MS*.

Schabel & Fleischer 2022

Schabel, S. & Fleischer, J. (2022), „Scherschneiden von Elektroden für die Li-Ionen-Zellen. Untersuchung der anlagenseitigen Prozessparameter und Bewertung der Schnittkantenqualität“, *wt Werkstattstechnik online*, 112 (07-08), S. 487–491. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-07-08-41>.

Schäfer & Weinmann et al. 2020

Schäfer, J.; Weinmann, H. W.; Mayer, D.; Storz, T.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2020), „Synergien zwischen Batterie- und Brennstoffzellen. Potenzialbewertung anhand von Struktur- und Maschinenparametern in der Fertigung“, *wt Werkstattstechnik online*, 110 (10), S. 735–741. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2020-10-91>.

Schilling & Schmitt et al. 2016

Schilling, A.; Schmitt, J.; Dietrich, F. & Dröder, K. (2016), „Analyzing Bending Stresses on Lithium-Ion Battery Cathodes induced by the Assembly Process“, *Energy Technology*, 4 (12), S. 1502–1508. <https://doi.org/10.1002/ente.201600131>.

Schmitt & Raatz et al. 2014

Schmitt, J.; Raatz, A.; Dietrich, F.; Dröder, K. & Hesselbach, J. (2014), „Process and performance optimization by selective assembly of battery electrodes“, *CIRP Annals*, 63 (1), S. 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.018>.

Schmitt & Raatz 2014

Schmitt, J. & Raatz, A. (2014), „Failure Mode Based Design and Optimization of the Electrode Packaging Process for Large Scale Battery Cells“, *Advanced Materials Research*, 907, S. 309–319. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.907.309>.

Schmuck & Wagner et al. 2018

Schmuck, R.; Wagner, R.; Hörpel, G.; Placke, T. & Winter, M. (2018), „Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries“, *Nature Energy*, 3 , S. 267–278. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0107-2>.

Schnell & Günther et al. 2018

Schnell, J.; Günther, T.; Knoche, T.; Vieider, C.; Köhler, L.; Just, A.; Keller, M.; Passerini, S. & Reinhart, G. (2018), „All-solid-state lithium-ion and lithium metal batteries – paving the way to large-scale production“, *Journal of Power Sources*, 382 , S. 160–175. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.062>.

Schönemann 2017

Schönemann, M. (2017), *Multiscale Simulation Approach for Battery Production Systems*, Springer, Cham. ISBN: 978-3-319-49366-4.

Schreiner 2023

Schreiner, D. (2023), *Simulationsgestützte Auslegung des Kalandrierprozesses und experimentelle Charakterisierung der Elektroden von Lithium-Ionen-Batterie-zelle*. Dissertation, Technische Universität München, München.

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), 1900840. <https://doi.org/10.1002/ente.201900840>.

Schröder & Aydemir et al. 2016

Schröder, R.; Aydemir, M.; Glodde, A. & Seliger, G. (2016), „Design and Verification of an Innovative Handling System for Electrodes in Manufacturing Lithium-ion Battery Cells“. *26th CIRP Design Conference 2016*. Procedia CIRP Volume 50, Hrsg. L. Wang & T. Kjellberg. 26th CIRP Design Conference. 15.-17.06.2016. Stockholm, Schweden, Elsevier, Amsterdam, S. 641–646. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.198>.

Schröder & Glodde et al. 2015

Schröder, R.; Glodde, A.; Aydemir, M. & Bach, G. (2015), „Process to Increase the Output of Z-Folded Separators for the Manufacturing of Lithium-Ion Batteries“, *Applied Mechanics and Materials*, 794 , S. 19–26. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.794.19>.

Schröder & Glodde et al. 2016

Schröder, R.; Glodde, A.; Aydemir, M. & Seliger, G. (2016), „Increasing Productivity in Grasping Electrodes in Lithium-ion Battery Manufacturing“. *49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016). Factories of the Future in the Digital Environment*. Procedia CIRP Volume 57, Hrsg. E. Westkamper & T. Bauernhansl. 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 25.-27.05.2016. Stuttgart, Deutschland, Elsevier, Amsterdam, S. 775–780.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.134>.

Schüle & Eyerer 2020

Schüle, H. & Eyerer, P. (2020), „Verarbeitung von Kunststoffen zu Bauteilen“ in *Polymer Engineering 2. Verarbeitung · Oberflächentechnologie · Gestaltung*, Hrsg. H. Schüle & P. Eyerer, Springer Vieweg, Berlin, S. 1–414.

Shahriari & Swersky et al. 2016

Shahriari, B.; Swersky, K.; Wang, Z.; Adams, R. P. & Freitas, N. de (2016), „Taking the Human Out of the Loop: A Review of Bayesian Optimization“, *Proceedings of the IEEE*, 104 (1), S. 148–175.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2494218>.

Siebertz & van Bebber et al. 2017

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplannung. Design of Experiments (DoE)*, 2. Aufl., Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-55743-3.

Smith & Stüble et al. 2023

Smith, A.; Stüble, P.; Leuthner, L.; Hofmann, A.; Jeschull, F. & Mereacre, L. (2023), „Potential and Limitations of Research Battery Cell Types for Electrochemical Data Acquisition“, *Batteries & Supercaps*, 6 (6), e202300080.
<https://doi.org/10.1002/batt.202300080>.

Spiegel & Heckmann et al. 2022

Spiegel, S.; Heckmann, T.; Altvater, A.; Diehm, R.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2022), „Investigation of edge formation during the coating process of Li-ion battery electrodes“, *Journal of Coatings Technology and Research*, 19 (1), S. 121–130. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00521-w>.

Spielbauer & Peteler et al. 2023

Spielbauer, M.; Peteler, F.; Németh, A.; Soellner, J.; Berg, P.; Bohlen, O. & Jossen, A. (2023), „An analysis of the current state and obstacles in discrete layered finite element simulation of crushing cylindrical lithium-ion cells“, *Journal of Energy Storage*, 72, Part A , 108029. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108029>.

Sterner & Bauer 2017

Sterner, M. & Bauer, F. (2017), „Definition und Klassifizierung von Energiespeichern“ in *Energiespeicher. Bedarf, Technologien, Integration*, Hrsg. M. Sterner & I. Stadler, Springer Vieweg, Berlin, S. 25–49.

Storz & Schild et al. 2021

Storz, T.; Schild, L.; Vogt, M.; Hofmann, J.; Fleischer, J. & Lanza, G. (2021), „Entwicklung eines flexiblen Produktionssystems für Batteriezellen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116 (4), S. 247–253. <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0049>.

Stühm & Tornow et al. 2014

Stühm, K.; Tornow, A.; Schmitt, J.; Grunau, L.; Dietrich, F. & Dröder, K. (2014), „A Novel Gripper for Battery Electrodes based on the Bernoulli-principle with Integrated Exhaust Air Compensation“. *5th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS 2014)*. Procedia CIRP Volume 23, Hrsg. M. Putz. 5th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems. 13.-14.11.2014. Dresden, Deutschland, Elsevier, Amsterdam, S. 161–164. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.065>.

Sung & Kim et al. 2020

Sung, S. H.; Kim, S.; Park, J. H.; Park, J. D. & Ahn, K. H. (2020), „Role of PVDF in Rheology and Microstructure of NCM Cathode Slurries for Lithium-Ion Battery“, *Materials*, 13 (20), 4544. <https://doi.org/10.3390/ma13204544>.

Sypeck & Zhu et al. 2023

Sypeck, D.; Zhu, F.; Deng, J. & Bae, C. (2023), „Mechanical and Optical Characterization of Lithium-Ion Battery Cell Components/Cross-Ply Lamination Effect“, *Batteries*, 9 (11), S. 541. <https://doi.org/10.3390/batteries9110541>.

Tamilselvi & Gunasundari et al. 2021

Tamilselvi, S.; Gunasundari, S.; Karuppiah, N.; Razak RK, A.; Madhusudan, S.; Nagarajan, V. M.; Sathish, T.; Shamim, M. Z. M.; Saleel, C. A. & Afzal, A. (2021),

„A Review on Battery Modelling Techniques“, *Sustainability*, 13 (18), 10042.
<https://doi.org/10.3390/su131810042>.

Tao & Liang et al. 2021

Tao, R.; Liang, Z.; Zhu, S.; Le Yang; Ma, L.; Song, W. & Chen, H. (2021), „Mechanical Analysis and Strength Checking of Current Collector Failure in the Winding Process of Lithium-Ion Batteries“, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 34 (3), S. 297–306. <https://doi.org/10.1007/s10338-020-00213-9>.

Techel & Lütke et al. 2011

Techel, A.; Lütke, M.; Althues, H.; Maaß, J.; Bräunling, S.; Tammer, C.; Föckerer, T.; Thiemann, C.; Franke, V.; Tschöcke, S.; Fux, V.; Schedewy, R.; Heinz, M.; Schweier, M.; Glonegger, M.; Standfuß, J.; Hensel, T.; Westermeier, M.; Jansen, I.; Wunderer, M.; Kurfer, J. & Zeilinger, T. (2011), *DeLIZ - Produktionstechnisches Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen. Ergebnisbericht zum Verbundvorhaben "Entwicklung neuer automatisierter Produktionsverfahren zur wirtschaftlichen Massenfertigung von hochenergetischen Lithium-Ionen-Zellen"*. Forschungsbericht, Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Stuttgart, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, ISBN: 978-3-8396-0339-0.

Thomitzek & Schmidt et al. 2021

Thomitzek, M.; Schmidt, O.; Abraham, T.; Cerdas, F.; Röder, F.; Krewer, U. & Herrmann, C. (2021), „Model-based identification of production tolerances in battery production“. *54th CIRP Conference on Manufacturing Systems (54th CIRP CMS 2021). "Towards Digitalized Manufacturing 4.0"*. Procedia CIRP Volume 104, Hrsg. D. Mourtzis. CIRP CMS 2021 - 54th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 22.-24.09.2021. Patras, Griechenland, Elsevier, Amsterdam, S. 1059–1064. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.178>.

Tran & Lindner et al. 2023

Tran, H.-Y.; Lindner, A.; Menesklou, W. & Braunwarth, W. (2023), „Toward Calendarability of High-Energy Cathode based on NMC622 during the Roll-to-Roll Process“, *Energy Technology*, 11 (5), 2201092.
<https://doi.org/10.1002/ente.202201092>.

Turetskyy & Thiede et al. 2020

Turetskyy, A.; Thiede, S.; Thomitzek, M.; Drachenfels, N. von; Pape, T. & Herr-

mann, C. (2020), „Toward Data-Driven Applications in Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing“, *Energy Technology*, 8 (2), 1900136.

<https://doi.org/10.1002/ente.201900136>.

Turetskyy & Wessel et al. 2020

Turetskyy, A.; Wessel, J.; Herrmann, C. & Thiede, S. (2020), „Data-driven cyber-physical System for Quality Gates in Lithium-ion Battery Cell Manufacturing“. *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS 2020)*. Procedia CIRP Volume 93, Hrsg. R. X. Gao & K. Ehmann. 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems. 01.-03.07.2020. Chicago, USA, Elsevier, Amsterdam, S. 168–173.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.077>.

Ventura Silva & Thomitzek et al. 2023

Ventura Silva, G.; Thomitzek, M.; Lippke, M.; Heckmann, T.; Karaki, H.; Lischka, C.; Möhlen, F.; Mayer, D.; Hagemeister, J.; Daub, R.; Fleischer, J.; Nirschl, H.; Schröder, D.; Scharfer, P.; Schabel, W.; Kwade, A. & Herrmann, C. (2023), „Digitalization Platform for Sustainable Battery Cell Production: Coupling of Process, Production, and Product Models“, *Energy Technology*, 11 (5), 2200801.

<https://doi.org/10.1002/ente.202200801>.

VDI 2221 Blatt 1

Verein deutscher Ingenieure e.V. (2019), *Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung, VDI 2221 Blatt 1:2019-11*, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 2803 Blatt 1

Verein deutscher Ingenieure e.V. (2019), *Funktionenanalyse – Grundlagen und Methode, VDI 2803 Blatt 1:2019-01*, Beuth Verlag, Berlin.

Vuorilehto 2013

Vuorilehto, K. (2013), „Materialien und Funktion“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 21–29.

Wang & Yang et al. 2016

Wang, W.; Yang, S. & Lin, C. (2016), „Clay-like Mechanical Properties of Components for the Jellyroll of Cylindrical Lithium-ion Cells“. *Applied Energy Symposium and Forum: Low-Carbon Cities and Urban Energy Systems (CUE 2016)*. *Clean Energy for Clean City*. Energy Procedia Volume 104, Hrsg. J. Yan, J. Yang, R. Wennersten, Y. Lv, B. Chen & Q. Sun. Applied Energy Symposium and Forum:

Low-Carbon Cities and Urban Energy Systems. 13.-15.06.2016. Jinan, China, Elsevier, Amsterdam, S. 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.011>.

Weinmann 2022

Weinmann, H. W. (2022), *Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Shaker Verlag, Düren, ISBN: 978-3-8440-8785-7.

Weinmann & Lang et al. 2018

Weinmann, H. W.; Lang, F.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2018), „Bahzugkraftregelung in der Batteriezellfertigung“, *wt Werkstattstechnik online*, 108 (7/8), S. 519–524. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2018-07-08-37>.

Weinmann & Töpfer et al. 2020

Weinmann, H. W.; Töpfer, H.-C. & Fleischer, J. (2020), „Coil2Stack: Ein innovatives Verfahren zur formatflexiblen Batteriezellherstellung“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115 (4), S. 241–243. <https://doi.org/10.3139/104.112192>.

Wirth & Vitzthum et al. 2023

Wirth, F.; Vitzthum, S.; Gerner, J.; Koprivc, A.; Hausmann, L. & Fleischer, J. (2023), „Methodology for the Mechanical Characterization of Rectangular Winding Wire in the Context of Electric Mobility“. *2023 13th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. 2023 13th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 29.-30.11.2023. Regensburg, Deutschland, IEEE, Piscataway, S. 1–9. <https://doi.org/10.1109/EDPC60603.2023.10372157>.

Woodcox & Shepard et al. 2021

Woodcox, M.; Shepard, R. & Smeu, M. (2021), „First principles investigation into the interwoven nature of voltage and mechanical properties of the $\text{Li}_x\text{NMC-811}$ cathode“, *Journal of Power Sources*, 516 , 230620. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230620>.

Wu & Maier et al. 2020

Wu, F.; Maier, J. & Yu, Y. (2020), „Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries“, *Chemical Society reviews*, 49 (5), S. 1569–1614. <https://doi.org/10.1039/c7cs00863e>.

Wu & Xiao et al. 2016

Wu, L.; Xiao, X.; Wen, Y. & Zhang, J. (2016), „Three-dimensional finite element study on stress generation in synchrotron X-ray tomography reconstructed nickel-manganese-cobalt based half cell“, *Journal of Power Sources*, 336 , S. 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.10.052>.

Wurba & Altmann et al. 2024

Wurba, A.-K.; Altmann, L. & Fleischer, J. (2024), „Analysis of longitudinal wrinkle formation during calendaring of NMC811 cathodes under variation of different process parameters“, *Production Engineering*, 18 , S. 497–506. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01258-8>.

Wurba & Klemens et al. 2023

Wurba, A.-K.; Klemens, J.; Mayer, D.; Reusch, C.; Altmann, L.; Leonet, O.; Blázquez, J. A.; Boyano, I.; Ayerbe, E.; Scharfer, P.; Schabel, W. & Fleischer, J. (2023), „Methodology for the characterization and understanding of longitudinal wrinkling during calendaring of lithium-ion and sodium-ion battery electrodes“. *56th CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2023*. Procedia CIRP Volume 120, Hrsg. K. Mporfu, N. Sacks & O. Damm. 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 24.-26.10.2023. Kapstadt, Südafrika, Elsevier, Amsterdam, S. 314–319. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.056>.

Wurm & Oettinger et al. 2018

Wurm, C.; Oettinger, O.; Wittkaemper, S.; Zauter, R. & Vuorilehto, K. (2018), „Anode materials for lithium-ion batteries“ in *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Hrsg. R. Korthauer, Springer, Berlin, S. 43–58.

Yang & Xie et al. 2023

Yang, K.; Xie, X.; Du, X.; Zuo, Y. & Zhang, Y. (2023), „Research on Micromechanical Behavior of Current Collector of Lithium-Ion Batteries Battery Cathode during the Calendaring Process“, *Processes*, 11 (6), 1800. <https://doi.org/10.3390/pr11061800>.

Yim & Choi et al. 2014

Yim, T.; Choi, S. J.; Jo, Y. N.; Kim, T.-H.; Kim, K. J.; Jeong, G. & Kim, Y.-J. (2014), „Effect of binder properties on electrochemical performance for silicon-graphite anode: Method and application of binder screening“, *Electrochimica Acta*, 136 , S. 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.05.062>.

Yoshihiro & Noriyuki et al. 2003

Yoshihiro, S.; Noriyuki, Y.; Tokukazu, T.; Shin, I. & Takumi, H. (2003), *Electrode Lamination Device and Gauging Device*, japanische Patentanmeldung JP 2 005 050 583 A.

Zanotto & Dominguez et al. 2022

Zanotto, F. M.; Dominguez, D. Z.; Ayerbe, E.; Boyano, I.; Burmeister, C.; Duquesnoy, M.; Eisentraeger, M.; Montaña, J. F.; Gallo-Bueno, A.; Gold, L.; Hall, F.; Kaden, N.; Muerkens, B.; Otaegui, L.; Reynier, Y.; Stier, S.; Thomitzek, M.; Turetskyy, A.; Vallin, N.; Wessel, J.; Xu, X.; Abbasov, J. & Franco, A. A. (2022), „Data Specifications for Battery Manufacturing Digitalization: Current Status, Challenges, and Opportunities“, *Batteries & Supercaps*, 5 (9), e202200224. <https://doi.org/10.1002/batt.202200224>.

Zhang & Huang et al. 2022

Zhang, J.; Huang, H. & Sun, J. (2022), „Investigation on mechanical and microstructural evolution of lithium-ion battery electrode during the calendaring process“, *Powder Technology*, 409 , 117828. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117828>.

Zhang & Santhanagopalan et al. 2015a

Zhang, C.; Santhanagopalan, S.; Sprague, M. A. & Pesaran, A. A. (2015), „A representative-sandwich model for simultaneously coupled mechanical-electrical-thermal simulation of a lithium-ion cell under quasi-static indentation tests“, *Journal of Power Sources*, 298 , S. 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.08.049>.

Zhang & Santhanagopalan et al. 2015b

Zhang, C.; Santhanagopalan, S.; Sprague, M. A. & Pesaran, A. A. (2015), „Coupled mechanical-electrical-thermal modeling for short-circuit prediction in a lithium-ion cell under mechanical abuse“, *Journal of Power Sources*, 290 , S. 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.04.162>.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.04.103>.

Zhang & Zhao et al. 2023

Zhang, Y.; Zhao, C.; Du, X.; Zhao, J. & Hu, Y. (2023), „Judgment Basis and Mechanical Analysis of Current Collector Failure in the Winding Process of a Lithium-Ion Battery“, *Processes*, 11 (9), 2629. <https://doi.org/10.3390/pr11092629>.

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.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.001>.

Zhu & Li et al. 2019

Zhu, J.; Li, W.; Wierzbicki, T.; Xia, Y. & Harding, J. (2019), „Deformation and failure of lithium-ion batteries treated as a discrete layered structure“, *International Journal of Plasticity*, 121 , S. 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2019.06.011>.

Zhu & Wierzbicki et al. 2018

Zhu, J.; Wierzbicki, T. & Li, W. (2018), „A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries“, *Journal of Power Sources*, 378 , S. 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.034>.

Zhu & Zhang et al. 2018

Zhu, J.; Zhang, X.; Luo, H. & Sahraei, E. (2018), „Investigation of the deformation mechanisms of lithium-ion battery components using in-situ micro tests“, *Applied Energy*, 224 , S. 251–266. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.007>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batteriezelle beim Entladevorgang in Anlehnung an (Bold 2023, S. 8; Vuorilehto 2013, S. 22)	8
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung gängiger Bauformen für Lithium-Ionen-Batteriezellen nach (Sauer & Ringbeck 2024, S. 139)	11
Abbildung 2-3: Hauptprozessschritte bei der Herstellung von Batteriezellen nach (Heimes & Dorn et al. 2024)	13
Abbildung 2-4: Typische Beschichtungsmuster für die Elektrodenfertigung in Anlehnung an (Spiegel & Heckmann et al. 2022; Weinmann 2022, S. 26)	14
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Kalandrierprozesses in Anlehnung an (Bold 2023, S. 20; Meyer 2019, S. 15)	17
Abbildung 2-6: Ausgewählte geometrische Fehlerbilder nach der Kalandrierung in Anlehnung an (Günther & Schreiner et al. 2019)	21
Abbildung 2-7: Industriell etablierte Prozessführung zur Herstellung von Einzelblattelektroden nach (Ma & Schabel et al. 2023; Schabel & Fleischer 2022)	24
Abbildung 2-8: Exemplarische Darstellung des Cambereffekts in Anlehnung an (Weinmann 2022, S. 31)	24
Abbildung 2-9: Verschiedene Arten von Zellverbänden mit jeweils unterschiedlichen Herstellungsverfahren in Anlehnung an (Weinmann 2022, S. 12)	26
Abbildung 2-10: Schematische Darstellung des Z-Faltens in a) und das Einzelblattstapeln in b) in Anlehnung an (Schäfer & Weinmann et al. 2020)	28
Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Greifflächen durch unterschiedliche Greifertypen in Stapelanlagen nach (Weinmann 2022, S. 50)	30
Abbildung 2-12: Exemplarische Darstellung verwendeter Systeme zur Ausrichtung von Elektroden in Stapelanlagen nach (Weinmann 2022, S. 52)	31
Abbildung 2-13: Unterschiedliche Verwendungsarten des Begriffs „Stapelgenauigkeit“ bei der Stapelbildung nach (Weinmann 2022, S. 44)	33
Abbildung 2-14: Größenskalen und Disziplinen zur Untersuchung mechanischer Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien und Modelle zur mechanischen Charakterisierung nach (Zhu & Wierzbicki et al. 2018)	35

Abbildung 3-1: Zielbild der vorliegenden Arbeit	50
Abbildung 3-2: Gewählte Vorgehensweise zur Behebung des Forschungsdefizits	51
<i>Abbildung 4-1 FAST-Diagramm für die Stapelbildung von Elektroden-Separator-Verbänden (ESV) in Anlehnung an (VDI 2803 Blatt 1)</i>	55
Abbildung 4-2: Als Referenz verwendete Batteriezelle des Batterietechnikums (BATEC) des Karlsruher Instituts für Technologie	56
Abbildung 4-3: Definierter Referenzprozess der im Rahmen der Arbeit betrachteten Einzelblattstapelbildung	57
Abbildung 4-4: Visualisierung der verwendeten Definition der Stapelgenauigkeit	59
Abbildung 4-5: Darstellung des Einzelblattstapelprozesses als kleinste Wertschöpfungseinheit in Anlehnung an (A_Fuchs 2023; A_Könn 2022; Schönemann 2017, S. 65)	60
Abbildung 4-6: Ishikawa-Diagramm für die resultierende Stapelgenauigkeit aus der Einzelblattstapelbildung als Black-Box-Modell in Anlehnung an (A_Freyd 2022; A_Fuchs 2023; A_Könn 2022)	62
Abbildung 5-1: Einordnung von Kapitel 5 in das Zielbild der Arbeit	66
Abbildung 5-2: Prozessschritte in der Batteriezellfertigung mit konstituierendem Einfluss auf die Einzelblattbreite b_K und die Einzelblattlänge l_K	68
Abbildung 5-3: 3D-Scan exemplarischer Kathodeneinzelblätter	69
Abbildung 5-4: Schematische Darstellung einer kalandrierten Kathode mit Wellen und Schnittlinie in a) und schematische Auswertung des DEI_y anhand der Schnittlinie in b)	73
Abbildung 5-5: Schematische Darstellung eines Einzelblatts in a) und schematische Auswertung der Schnittlinie des Einzelblatts $z_E, y(x)$ anhand der Position x_E, y, max und des Maximums $max(z_E, yx)$ in b)	74
Abbildung 5-6: Versuchsablauf zur Untersuchung der kalandrierten Kathoden sowie der vereinzelt Kathodenblätter in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)	75
Abbildung 5-7: Messaufbau zur Vermessung der Welligkeit nach der Kalandrierung in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)	76

Abbildung 5-8: Bandstahlschnittanlage (links) und zugehöriges Bandstahlschnittwerkzeug (rechts)	78
Abbildung 5-9: Messaufbau zur Vermessung der Kathodeneinzelblattgeometrie in Anlehnung an (A_Wang 2021, S. 36)	78
Abbildung 5-10: Untersuchte Effekte bei der Kalandrierung der NMC-Kathoden	83
Abbildung 5-11: Kathode nach der Kalandrierung in a) mit exemplarischer Messaufnahme und angedeuteten Schnittlinien für Mittenwellen bei $y_K = 80 \text{ mm}$ und Randwellen bei $y_K = 150 \text{ mm}$ in b)	84
Abbildung 5-12: Exemplarische Berechnung des <i>DEIM</i> einer gemessenen Mittenwelle nach der Methodik von (Mayr & Schreiner et al. 2022)	85
Abbildung 5-13: Charakterisierung der Mittenwellen mittels DEI aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbeladung nach (Mayer & Schwab et al. 2023)	86
Abbildung 5-14: Erweiterte Untersuchung des Materials NMC811 mit $41,6 \text{ mg cm}^{-2}$ bei variierenden Verdichtungsraten und konstantem Bahnzug in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)	88
Abbildung 5-15: Haupteffektediagramm für die Mittelwerte des <i>DEIM</i> aufgeschlüsselt nach den Bahnzügen	88
Abbildung 5-16: Erweiterte Untersuchung des Materials NMC811 mit $41,6 \text{ mg cm}^{-2}$ bei variierenden Bahnzügen und konstantem Verdichtungsgrad (25 %) in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)	89
Abbildung 5-17: Gegenüberstellung aller Messungen nach Massenbeladung m_B in a) und nach Aktivmaterial in b)	90
Abbildung 5-18: Charakterisierung der Mittenwellen mittels der normierten Wellenzahl n_W , M pro 300 mm Kathodenbahn aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbeladung in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)	92
Abbildung 5-19: Gegenüberstellung aller gemessenen Wellen (auf 300 mm Kathodenbahn normiert) nach Bahnzug FB in a) und nach Aktivmaterial in b)	93
Abbildung 5-20: Kathode mit Randwellen und typischem Übergang von Rand- zu Mittenwellen in a) und exemplarische Auswertung der Randwellenschnittlinie mittels <i>DEIR</i> in b)	94

Abbildung 5-21: Vergleich des <i>DEIR</i> der Randwellen mit dem <i>DEIM</i> der Mittenwellen gruppiert nach Aktivmaterial und Massenbeladung m_B , aufgetragen über den Verdichtungsgrad Π_B in % und den Bahnzug FB in N	95
Abbildung 5-22: Auf 300 mm Kathodenbahn normierte Anzahl der Randwellen $n_{W,R}$ aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbeladung	96
Abbildung 5-23: Charakterisierung der Kathodenblätter mittels Schnittlinien auf Seite A und Seite B	98
Abbildung 5-24: Häufig auftretende Charakteristiken der Schnittlinien der Kathodeneinzelblätter bei $y_E = 70 \text{ mm}$ und $y_E = 130 \text{ mm}$	99
Abbildung 5-25: Auftreten von Rand- und Mittenwellen sowie der Coillagerzeit	101
Abbildung 5-26: Exemplarische Messung einer vereinzelt Kathode mit den drei Schnittlinien $y_E = 10 \text{ mm}$, $y_E = 70 \text{ mm}$ und $y_E = 130 \text{ mm}$, gedreht auf Seite A in a) und Seite B in b) in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)	102
Abbildung 5-27: Verteilung der Maxima in der Schnittlinie $y_E = 130 \text{ mm}$ der ausgewerteten Messpunkte der 36 Parametervariationen jeweils auf Seite A in a) und Seite B in b) nach (Mayer & Schwab et al. 2023)	103
Abbildung 5-28: Durchschnittliche Maxima jeder kalandrierten Parameterkonfiguration ausgewertet in Schnittlinie $y_E = 70 \text{ mm}$ auf Seite A des Blattes aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbeladung	104
Abbildung 5-29: Haupteffektdiagramm der vier Einflussfaktoren Verdichtungsgrad, Aktivmaterial, Massenbeladung und Bahnzug bei Seite A	105
Abbildung 5-30: Durchschnittliche Maxima jeder kalandrierten Parameterkonfiguration ausgewertet in Schnittlinie $y_E = 70 \text{ mm}$ auf Seite B des Blattes aufgeteilt nach Aktivmaterial und Massenbeladung nach (Mayer & Schwab et al. 2023)	106
Abbildung 5-31: Haupteffektdiagramm der vier Einflussfaktoren Verdichtungsgrad, Aktivmaterial, Massenbeladung und Bahnzug bei Seite B	107
Abbildung 5-32: Einfluss der Coillagerzeit auf die Wölbung der vereinzelt Kathodenblätter anhand der Schnittlinien bei $y_E = 70 \text{ mm}$ auf Seite A	109
Abbildung 5-33: Auswirkung der Lagerzeit auf die Randwellen bei der Schnittlinie $y_E = 130 \text{ mm}$ für eine Verdichtung von $\Pi_B = 35 \%$ auf Seite A der Einzelblätter	111

Abbildung 6-1: Einordnung von Kapitel 6 in das Zielbild der Arbeit	113
Abbildung 6-2: Vorgehen zur Entwicklung des Versuchstands in Anlehnung an (VDI 2221 Blatt 1)	115
Abbildung 6-3: Morphologischer Kasten mit möglichen und ausgewählten Teillösungen in Anlehnung an (A_Kaiser 2022)	119
Abbildung 6-4: Säulenführungsgestell mit Wälzführungen (links) und Greifer (rechts) in Anlehnung an (A_Kaiser 2022)	124
Abbildung 6-5: Ausrichttisch und Schieber mit Aktorik zur gleichmäßigen Bewegung der Schieber in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	124
Abbildung 6-6: Aufbau des Niederhaltermoduls in Anlehnung an (A_Kaiser 2022)	125
Abbildung 6-7: Versuchsstand zur Untersuchung der Einzelblattstapelbildung	126
Abbildung 6-8: Auf die einzelnen Prozessschritte aufgeteilte Zielgrößen	127
Abbildung 6-9: Schematische Darstellung der Kathodeneckpunkte am Beispiel des Ausricht- und Greifprozesses mit $PAG, 1..4(XAG, 1..4, YAG, 1..4)$	128
Abbildung 6-10: Faktorstufen der Kathodenabmaße in a) und Auslegung des Untermaßes in b) in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	131
Abbildung 6-11: Versuchsablauf zur Untersuchung des Ausricht- und Greifprozesses in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	135
Abbildung 6-12: Gemessene Kathodeneckpunkte PAG nach dem Ausricht- und Greifprozess gegliedert nach den Eckpunkten $PAG, 1..4$ (links) und gegliedert nach Unter- und Übermaß (rechts)	136
Abbildung 6-13: Haupteffektediagramme (links) und Paretodiagramme (rechts) für die X- und Y-Koordinaten der Punkte $P_{AG,1}$ und $P_{AG,2}$	137
Abbildung 6-14: Durch das Übermaß bedingte, exemplarische Aufwölbungen der Kathode nach dem Ausrichten für Seite A in a) und Seite B in b)	138
Abbildung 6-15: Makroskopischer Vergleich der Schnittkanten einer Kathode mittels Feinstanze (links) bzw. mittels Bandstahlschnitt (rechts) vereinzelt	140
Abbildung 6-16: Gegenüberstellung der Streuung der euklidischen Distanz von PAG und PM für jede Kathodenecke	141
Abbildung 6-17: Versuchsablauf zur Untersuchung des Handhabungsprozesses	143

Abbildung 6-18: Euklidische Distanz der Referenzpunkte $PH, 1$ (oben) und $PH, 2$ (unten) als Maß für die Verschiebung der Kathode während des Handhabungsprozesses	144
Abbildung 6-19: Versuchsablauf zur Untersuchung des Ablageprozesses in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	146
Abbildung 6-20: Gemessene Kathodeneckpunkte PAb nach dem Ablageprozess gegliedert nach den Eckpunkten $PAb, 1..4$ (links) und gegliedert nach Unter- und Übermaß (rechts) in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	147
Abbildung 6-21: Haupteffektdiagramme (links) und Paretodiagramme (rechts) für die X- und Y-Koordinaten der Punkte $P_{Ab,1}$ und $P_{Ab,2}$	148
Abbildung 6-22: Vergleich der Geometrie der Kathode nach dem Ausricht- und Greifprozess mit Aufwölben der Ecken (links) und dem Ablageprozess mit Hochklappen des Ableiterfähnchens (rechts)	149
Abbildung 6-23: Positive Differenz der mittleren Kathodenblattkantenlänge zwischen dem Ausricht- und Greifprozess sowie dem Ablageprozess als Indikator für die flächigere Fixierung nach dem Ablageprozess	150
Abbildung 6-24: Gemessene Eckpunktpositionen der Kathoden nach dem Ablageprozess für vier Kathodenmaße in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	152
Abbildung 6-25: Versuchsablauf zur Untersuchung der Niederhalter-Greifer-Interaktion im Stapel nach (A_Freyd 2022) und (A_Fuchs 2023)	157
Abbildung 6-26: Gemittelte euklidische Distanz der Punkte $P_{NGI,1}$ (unten) und $P_{NGI,2}$ (oben) zwischen Kathodenablage auf den Stapel und nach Beendigung der Niederhalter-Greifer-Interaktion bzw. des Stapelvorgangs	159
Abbildung 6-27: Haupteffektdiagramme (links) und Paretodiagramm der standardisierten Effekte (rechts) für die euklidische Distanz der Punkte $P_{NGI,1}$ und $P_{NGI,2}$	160
Abbildung 6-28: Auffächern des Stapels ohne Niederhalter und ohne Keil (links) und Fixierung der Lage mittels Niederhalter und eingeschobenen Keil während der Messaufnahme (rechts)	161
Abbildung 6-29: Darstellung der euklidischen Distanz der Punkte $P_{NGI,1}$ und $P_{NGI,2}$ aufgeteilt nach der jeweiligen Lage im Stapel	162
Abbildung 7-1: Einordnung von Kapitel 7 in das Zielbild der Arbeit	164

Abbildung 7-2: Aufbau des Modells in Abaqus 2022 basierend auf dem aufgebauten Versuchsstand in Anlehnung an (Mayer & Maier et al. 2023)	166
Abbildung 7-3: Methode zur Ableitung der Parameter des Materialmodells in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	169
Abbildung 7-4: Versuchsaufbau der Zugprüfung in a) mit den Spannungs-Dehnungsdiagrammen für die gesamte Kathode in b) und die Aluminiumfolie in c) in Anlehnung an (A_Schwab 2022)	172
Abbildung 7-5: Versuchsaufbau des 2-Punkt-Biegeversuchs in a) und die Messergebnisse in b) in Anlehnung an (A_Schwab 2022)	173
Abbildung 7-6: Vergleich der experimentellen Daten und der berechneten Daten der Aluminiumfolie	175
Abbildung 7-7: Vorgehen zur Ermittlung der Beschichtungsfließkurve σ_f, B nach (A_Fuchs 2023)	176
Abbildung 7-8: Modellaufbau der Biegesimulation in Abaqus in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	177
Abbildung 7-9: Vergleich der experimentellen 2-Punkt-Biegekurve mit Simulationslauf Nr. 1 und $\tau_1 = 0,071$ in a) und mit Simulationslauf Nr. 74 und $\tau_{74} = 0,0047$ in b)	179
Abbildung 7-10: Vergleich der Zugversuchsimulation mit dem Experiment in a) und die prozentuale Abweichung der Simulation im Vergleich zu den experimentellen Daten in b)	180
Abbildung 7-11: Konvergenzanalyse zur Ermittlung einer geeigneten Elementgröße für die vier Eckpunkte der Kathode P_1 in a), P_2 in b), P_3 in c) und P_4 in d).	183
Abbildung 7-12: Betragmäßige Differenz der Eckpunktverschiebungen $ \Delta u_P $ zwischen Simulation und Experiment in x- und y-Richtung für Nenn- und Übermaß und Untermaß 1 & 2	185
Abbildung 7-13: Verschiebungsdifferenzen zwischen Simulation und Experiment für x- und y-Richtung in a) und die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Verschiebungsdifferenzen für die x-Richtung in b) und die y-Richtung in c)	186
Abbildung 7-14: Mögliche Auswirkung des Cambereffekts auf ein vereinzelt Kathodenblatt in Anlehnung an (Weinmann 2022, S. 31)	187

- Abbildung 7-15: Simulative Untersuchung unterschiedlicher Ausprägungen des Cambereffekts auf die Stapelgenauigkeit anhand der Position der vier Eckpunkte 188
- Abbildung 7-16: Betragsmäßige Abweichung der Simulationen von der Referenz in x-Richtung $|\Delta u_P, Nenn, x|$ in a) und in y-Richtung $|\Delta u_P, Nenn, y|$ in b) 189
- Abbildung 0-1: Einfluss der Coillagerzeit auf die Wölbung der vereinzelter Kathodenblätter anhand der Schnittlinien bei $y_E = 70 \text{ mm}$ auf Seite B XII
- Abbildung 0-2: Haupteffektdiagramme (links) und Paretodiagramme (rechts) für die X- und Y-Koordinaten der Punkte $PAG, 3$ und $PAG, 4$ XIII
- Abbildung 0-3: Haupteffektdiagramme (links) und Paretodiagramme (rechts) für die X- und Y-Koordinaten der Punkte $PAb, 3$ und $PAb, 4$ XIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Auftretende Fehlerbilder an kalandrierten Elektroden nach (Bold & Fleischer 2018; Günther & Schreiner et al. 2019)	20
Tabelle 4-1: Strukturparameter des vereinzelt Kathodenblattes mit möglichem Einfluss auf die Stapelgenauigkeit nach der Stapelbildung in Anlehnung an (Mayer & Fleischer 2021)	63
Tabelle 5-1: Zielgrößen zur Untersuchung der Welligkeit nach der Kalandrierung und der Unebenheiten im Einzelblatt	74
Tabelle 5-2: Materialkonfigurationen im unkalandrierten Zustand mit jeweils zwei Aktivmaterialtypen und zwei Massenbeladungen in Anlehnung an (Mayer & Schwab et al. 2023)	81
Tabelle 5-3: Untersuchte Einflussfaktoren und deren Ausprägungen	83
Tabelle 5-4: Berechnete Parameter für den Regressionskoeffizienten a_K, DEI sowie das Bestimmtheitsmaß R^2	87
Tabelle 5-5: Linienlast in Abhängigkeit des Aktivmaterials, der Massenbeladung und Verdichtungsgrads nach (Mayer & Schwab et al. 2023)	90
Tabelle 5-6: Lagerzeiten der auf Coils aufgewickelten Kathoden der durchgeführten Kalandrierversuche vor der Vereinzeltung nach (Mayer & Schwab et al. 2023)	108
Tabelle 5-7: Untersuchte Parameter mit variierenden Coillagerzeiten	108
Tabelle 6-1: Anforderungen an den Versuchsstand in Anlehnung an (A_Kaiser 2022) und (Bender & Gericke 2021, S. 195)	116
Tabelle 6-2 Zielgrößen mit Prozessschritt und Einheiten	129
Tabelle 6-3: Zu untersuchende Einflussfaktoren und Faktorstufen in der Einzelblattstapelbildung in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	131
Tabelle 6-4: Definitive Screening Versuchsplan für die Ausricht- und Greif- und Ablageprozesse in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	133
Tabelle 6-5: Teilfaktorieller Versuchsplan 2^{5-2} für die Niederhalter-Greifer-Interaktion	133
Tabelle 6-6: Parameter für die Untersuchung des Schnittkanteneinflusses	141

Tabelle 6-7: Parameter für die Untersuchung des Maßeinflusses der Kathoden in Anlehnung an (A_Fuchs 2023)	151
Tabelle 6-8: Nach Kathodenmaß aufgeschlüsselte Streuung der jeweiligen Eckpunktpositionen der Kathodenblätter nach dem Ablageprozess	153
Tabelle 6-9: Gruppierte Streuung der jeweiligen Eckpunktpositionen der Kathodenblätter nach dem Ablageprozess	154
Tabelle 7-1: Materialparameter zur Validierung des Simulationsmodells	182
Tabelle 0-1: Versuchsplan für die Kalandrierung der Kathoden und der ausgewerteten Kathodeneinzelblätter in Anlehnung an (A_Schwab 2022)	XI

Anhang

Tabelle 0-1: Versuchsplan für die Kalandrierung der Kathoden und der ausgewerteten Kathodeneinzelblätter in Anlehnung an (A_Schwab 2022)

Versuchsnr.	Aktivmaterial	Massenbeladung in mg cm ⁻²	Verdichtungsgrad in %	Bahnzug in N	Anzahl der Einzelblätter
1	NMC811	41,6	15	10	10
2	NMC811	41,6	15	30	8
3	NMC811	41,6	15	50	8
4	NMC811	41,6	25	10	9
5	NMC811	41,6	25	30	7
6	NMC811	41,6	25	50	8
7	NMC811	41,6	35	10	9
8	NMC811	41,6	35	30	8
9	NMC811	41,6	35	50	10
10	NMC811	55,0	15	10	8
11	NMC811	55,0	15	30	7
12	NMC811	55,0	15	50	9
13	NMC811	55,0	25	10	10
14	NMC811	55,0	25	30	6
15	NMC811	55,0	25	50	8
16	NMC811	55,0	35	10	9
17	NMC811	55,0	35	30	7
18	NMC811	55,0	35	50	5
19	NMC622	41,6	15	10	9
20	NMC622	41,6	15	30	7
21	NMC622	41,6	15	50	8
22	NMC622	41,6	25	10	6
23	NMC622	41,6	25	30	9
24	NMC622	41,6	25	50	8
25	NMC622	41,6	30	10	9
26	NMC622	41,6	30	30	8
27	NMC622	41,6	30	50	8
28	NMC622	55,0	15	10	7
29	NMC622	55,0	15	30	6
30	NMC622	55,0	15	50	8
31	NMC622	55,0	25	10	9
32	NMC622	55,0	25	30	8
33	NMC622	55,0	25	50	7
34	NMC622	55,0	30	10	9
35	NMC622	55,0	30	30	8
36	NMC622	55,0	30	50	9

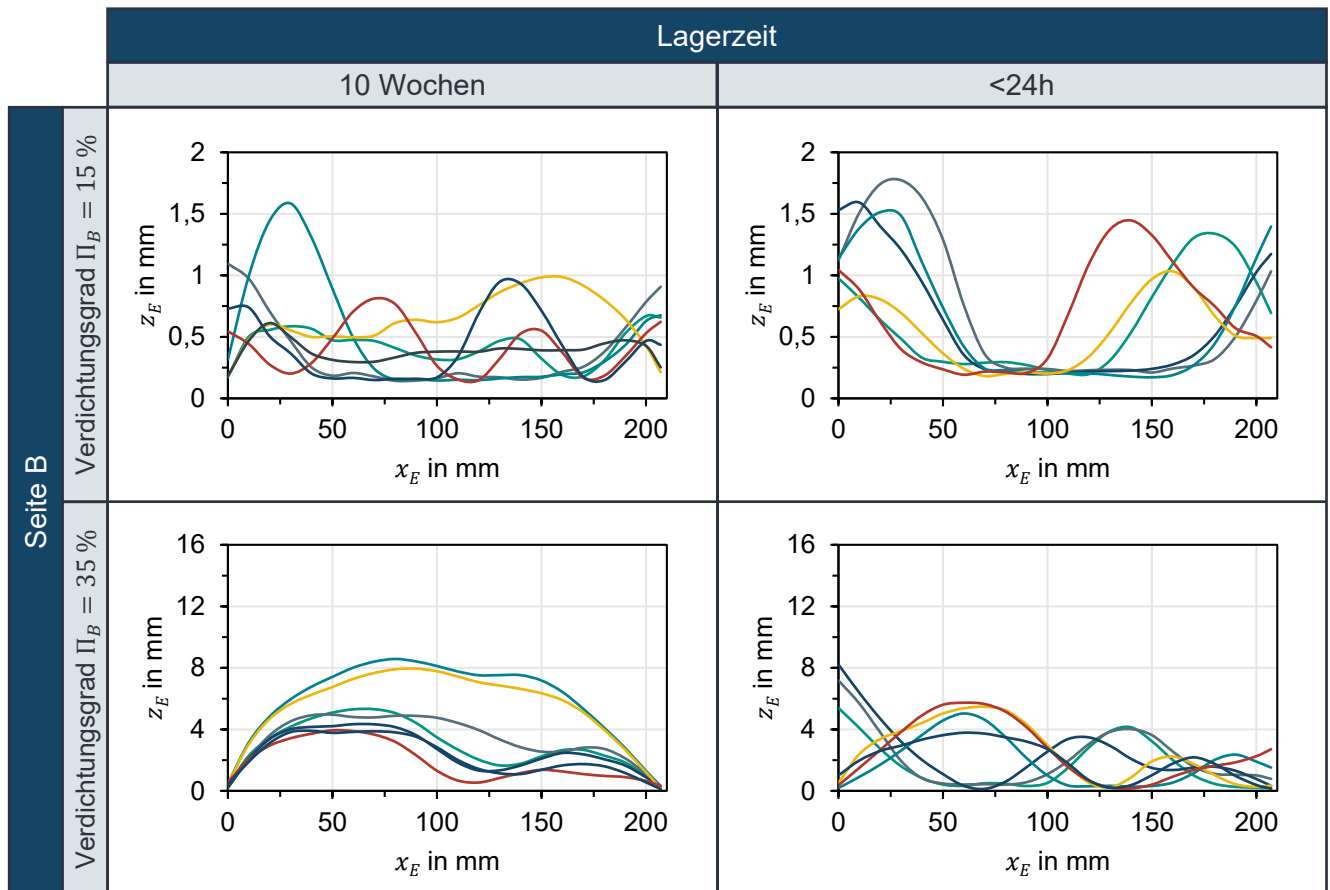
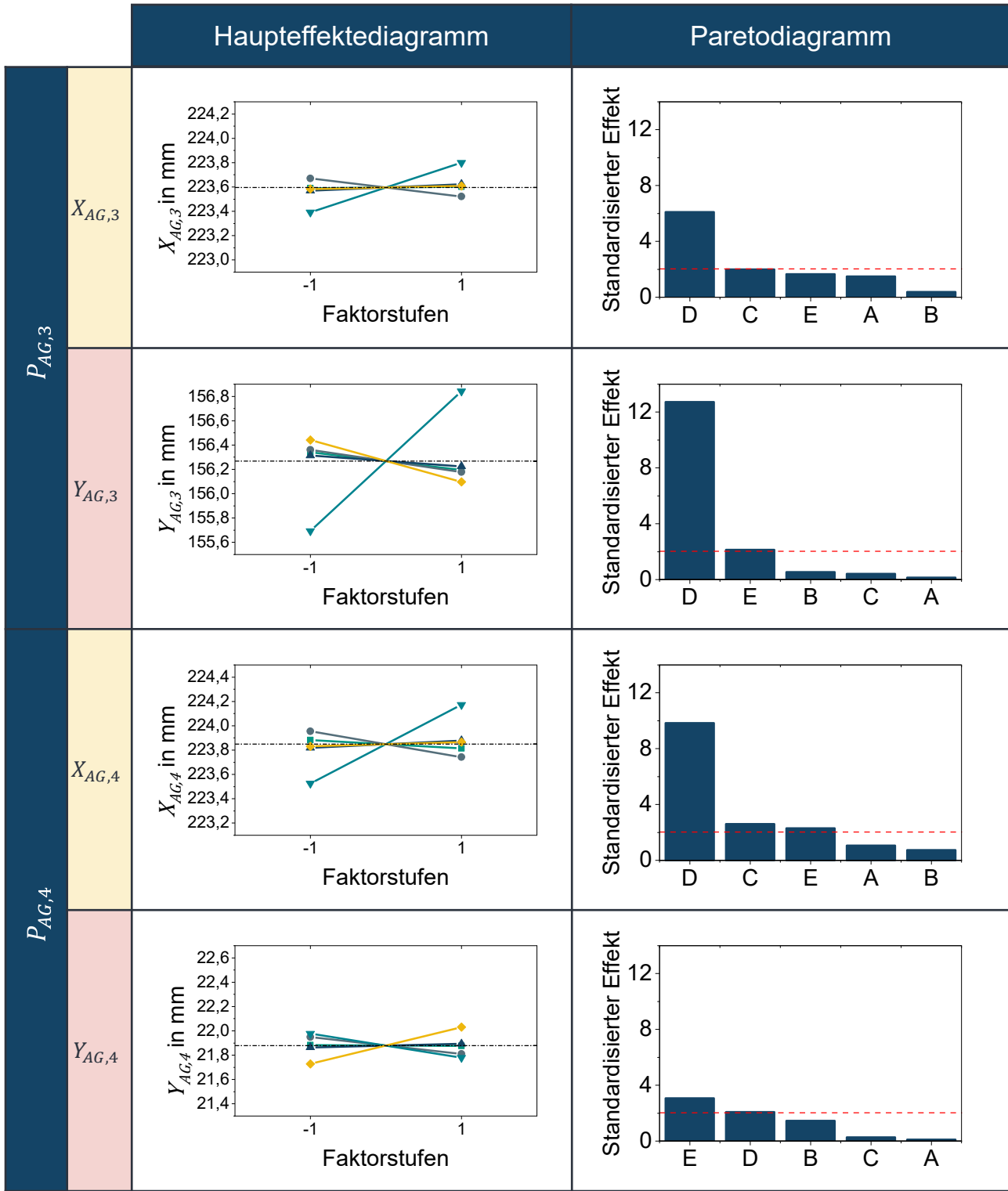


Abbildung 0-1: Einfluss der Coillagerzeit auf die Wölbung der vereinzellen Kathodenblätter anhand der Schnittlinien bei $y_E = 70\text{ mm}$ auf Seite B

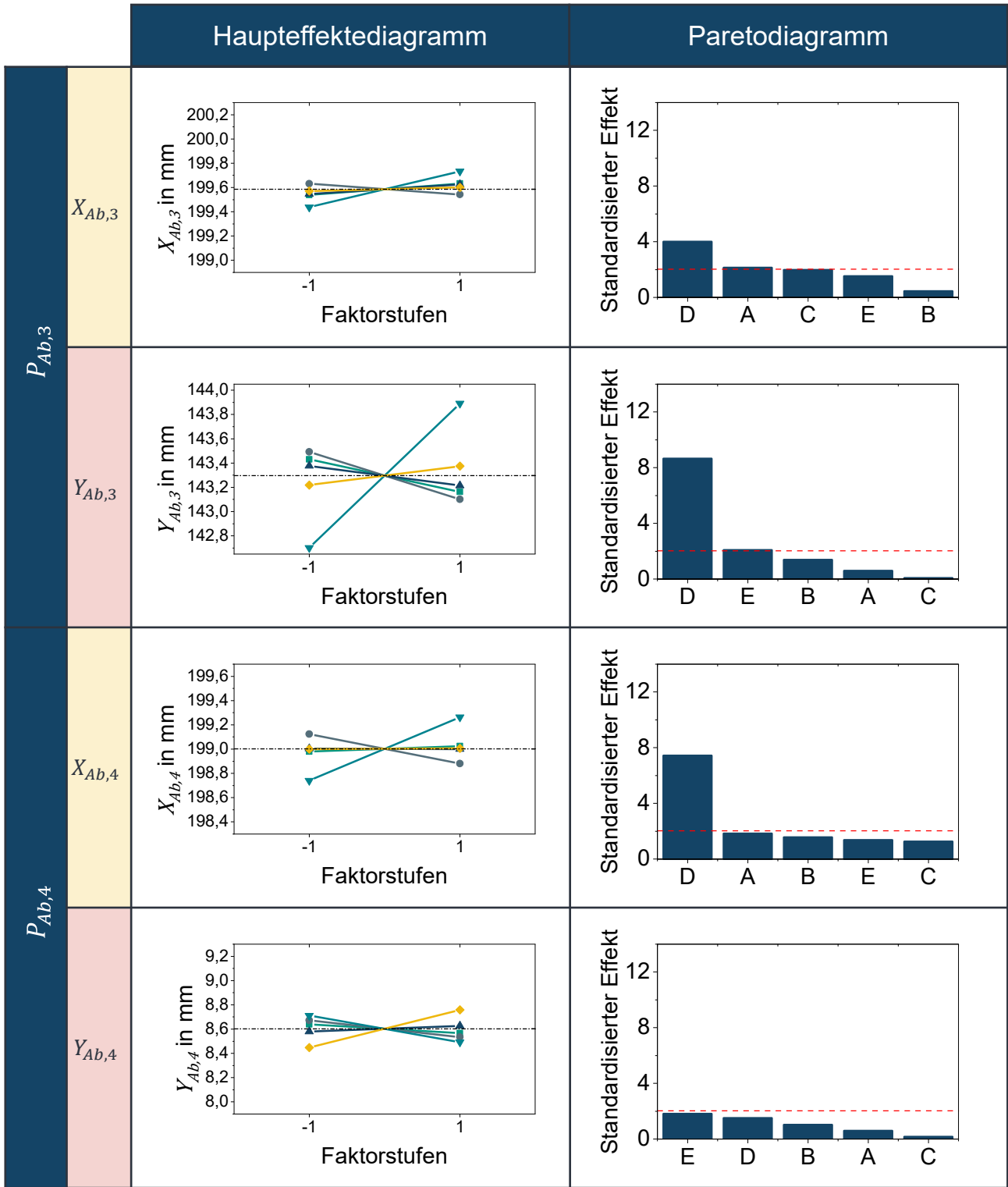


Legende:

- A: Aktivmaterial
- B: Massenbelastung
- ▲ C: Verdichtungsgrad
- ▼ D: Geometrische Abmaße
- ◆ E: Ablageseite

- - - Mittelwert
- - - Signifikanzgrenze

Abbildung 0-2: Haupteffektdiagramme (links) und Paretdiagramme (rechts) für die X- und Y-Koordinaten der Punkte $P_{AG,3}$ und $P_{AG,4}$



Legende:

- A: Aktivmaterial
- B: Massenbelastung
- ▲ C: Verdichtungsgrad
- ▼ D: Geometrische Abmaße
- ◆ E: Ablageseite

- - - - Mittelwert
- - - - Signifikanzgrenze

Abbildung 0-3: Haupteffektdiagramme (links) und Paretdiagramme (rechts) für die X- und Y-Koordinaten der Punkte $P_{Ab,3}$ und $P_{Ab,4}$

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 Abkanteilen

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 fünfachsigem 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 bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des 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 Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

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 Vossman

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

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmäzle

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
Abrasive Strahlschneiden**

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 Gönninger

**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 Dienstleistungs-
organisationen: 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

Prozesskraftrichtungsangepasste 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 Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-effizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für 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 Mikrotexturierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

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 Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetribspindeln

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 Planetenwälgwindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

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

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

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Band 289

Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

Prozessgeregelte Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren

Band 290

Dr.-Ing. Patrizia Konstanze Gartner

Konzept eines Selbstheilungsmechanismus für Polymerelektrolytmembranen

Optimierung der Lebensdauer und der Effizienz von Brennstoffzellen

Band 291

Dr.-Ing. Jens Schäfer

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

Band 292

Dr.-Ing. Gwen Louis Steier

Strategischer Fit in globalen Produktionsnetzwerken

Entscheidungsunterstützung für die strategische Netzwerkkonfiguration

Band 293

Dr.-Ing. Louis Schäfer

Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung:

Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 294

Dr.-Ing. Jan-Philipp Kaiser

Autonomous View Planning using Reinforcement Learning

Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Band 295

Dr.-Ing. Wilken Wößner

Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 296

Dr.-Ing. Ann-Kathrin Wurba

Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von Batterieelektroden

Band 297

Dr.-Ing. Simon Mangold

Automatisierte Demontage von Schraubverbindungen für das Remanufacturing

Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle

Band 298

Dr.-Ing. Eduard Gerlitz

Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen in Lithium-Ionen-Batteriemodulen

Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen Demontage von Traktionsbatterien

Band 299

Dr.-Ing. Edgar Mühlbeier

Mechatronisches Koppelsystem für die prozessunabhängige, kraftgeregelte Kopplung von seriellen Roboterkinematiken

Band 300

Dr.-Ing. Martin Benfer

Decision-Making in Production Network Configuration

A Design Framework for Digital Twins of Global Production Networks

Band 301

Dr.-Ing. Victor Lubkowitz

Keramikverstärkte Aluminiumwerkstoffe für das pulverbettbasierte selektive Laserschmelzen

Beschichtung, Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften von Mikro-B₄C- und Nano-TiC-verstärkten AlSi10Mg-Feedstocks, verarbeitet im PBF-LB-Prozess

Band 302

Dr.-Ing. Alex Frey

Datenbasierte Erstellung und Überprüfung von Modellen zur Produkt- und Prozesskonfiguration

Band 303

Dr.-Ing. Johannes Schubert

Werkstoff- und Prozessanalyse zur Herstellung keramischer Werkstoffverbunde mittels badbasierter Photopolymerisation (VPP-LED)

Band 304

Dr.-Ing. Tassilo Arndt

Simulative und experimentelle Untersuchung des Rotationsunrunddrehens zur hochproduktiven Herstellung unrunder Bauteilquerschnitte

Band 305

Dr.-Ing. Kamal Hussein

Modellierung maschinenseitiger Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess von Batteriezellen

Band 306

Dr.-Ing. Marco Friedmann

Automatisierte Konfiguration von Greiferfingern aus einem modularen Baukasten

Band 307

Dr.-Ing. Jannik Konstantin Schwalm

Hämmerndes Drehen

Entwicklung eines hybriden Prozesses zur hauptzeitparallelen mechanischen Oberflächenbehandlung und Oberflächentexturierung während der Zerspanung

Band 308

Dr.-Ing. Dominik Mayer

Analyse prozessübergreifender Wirkzusammenhänge zur Modellierung der Stapelbildung in der Batteriezellfertigung

Ein Beitrag zur Bewertung geometrischer Effekte in Elektroden auf die Stapelgenauigkeit

