Institut für Produktionstechnik

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

Benjamin Bold

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

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

Band 273

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

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

Benjamin Bold

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

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

Band 273

wbk
Institut für Produktionstechnik

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

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

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

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

DISSERTATION

von

Benjamin Bold, M.Sc.
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung:	11.10.2023
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Rüdger Daub

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9311-7
ISSN 0724-4967

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

Vorwort des Herausgebers

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

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

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

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

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

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

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

Karlsruhe, Oktober 2023

Benjamin Bold

Kurzfassung

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

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

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

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

Abstract

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

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

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

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **I**

Abkürzungen **III**

Formelzeichen **VI**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit 4

2 Grundlagen der Funktionsweise und Herstellung einer Batteriezelle **7**

2.1 Aufbau und Funktionsweise einer Batteriezelle 7

2.2 Batteriezellproduktion 15

2.3 Kalandrieren 25

2.3.1 Verbesserungen der elektrochemischen Eigenschaften 25

2.3.2 Veränderungen der mechanischen Eigenschaften 28

3 Stand der Forschung und Technik des Kalandrierens **35**

3.1 Beschreibung von Walzvorgängen 35

3.2 Stand der Technik des Kalandrierens von Batterieelektroden 38

3.3 Elektrodendefekte und deren qualitative Ursachen 42

3.4 Wirkzusammenhänge zwischen benachbarten Prozessschritten 49

3.5 Bewertung des Stands der Technik und Forschungshypothese 56

4 Zielsetzung und Vorgehensweise **58**

5 Prozessverständnis der Wrinkle-Bildung **60**

5.1 Experimentelle Vorgehensweise zur Beschreibung der Wrinkle-Bildung 60

5.2 Verzerrungsdetektion 76

5.3 Wrinkle-Detektion 91

5.4 Versuchsplanung am Standardkalandrierprozess 100

6 Modellbildung **105**

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

Abkürzungen

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

Li-Ionen	Lithium-Ionen
Li-NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
Li-NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
$LiPF_6$	Lithiumhexafluorophosphat (Leitsalz)
MLP	Multi-Layer-Perceptron
MP	Megapixel
NMC 111	Li-NMC-Aktivmaterial mit dem Verhältnis Nickel:Mangan:Kobalt von 1:1:1
NMC 622	Li-NMC-Aktivmaterial mit dem Verhältnis Nickel:Mangan:Kobalt von 6:2:2
NMC 811	Li-NMC-Aktivmaterial im Verhältnis Nickel:Mangan:Kobalt von 8:1:1
NMP	N-Methyl-2-Pyrrolidon
PC	Personal Computer
PVDF	Polyvinylidenfluorid
R	Rot
R2R	Roll-to-Roll – Rollenprozess
RB-Zylinder	Roll-Bending-Zylinder
R-CNN	Region-Based Convolutional Neural Network
REM	Rasterelektronenmikroskop
RGB-Raum	Farbraum, dargestellt mittels der Farben Rot, Grün und Blau
ROI	Region of Interest
RS 232	Recommended Standard 232
SdT	Stand der Technik
SEI	Solid Electrolyte Interface
sek.	Sekunde
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk

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

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\% \, vol$	Volumenprozent	-
A	Amplitude – materialanhängige Konstante	-
A_p	Fläche einer Stanzprobe	m²
B	Potenz – materialabhängige Konstante	-
$B(i,j)$	Blau-Wert an der Stelle i,j in der Aufnahme	-
C_A	Flächenkapazität	mAh/cm²
c_1, c_2	Steifigkeit	N/m
C	C-Rate: Quotient aus Entlade- oder Ladestrom und der Nennkapazität	h^{-1}
$\tilde{C}$	Cauchy-Green-Deformationsgradient	-
d	Materialdicke	µm
$\Delta d_{Beschichtung,unkal}$	Abstand zweier Punkte auf der Beschichtung einer Elektrode im unkalandrierten Zustand	mm
$\Delta d_{Beschichtung,kal}$	Abstand zweier Punkte auf der Beschichtung einer Elektrode im kalandrierten Zustand	mm
d_{kal}	kalandrierte Elektrodendicke	µm
$d_{Kollektor}$	Dicke der Kollektorfolie	µm
$\Delta d_{Kollektor,unkal}$	Abstand zweier Punkte auf dem Kollektor einer Elektrode im unkalandrierten Zustand	mm
$\Delta d_{Kollektor,kal}$	Abstand zweier Punkte auf dem Kollektor einer Elektrode im kalandrierten Zustand	mm
d_{unkal}	unkalandrierte Elektrodendicke	µm
d_{Ziel}	zu erzielende kalandrierte Elektrodendicke	µm
F	Deformationsgradient	-
f_{act}	Aktivierungsfunktion	-
$\vec{F}_{Ab}$	Bahnzugkraft Abwickler	N
$\vec{F}_{Auf}$	Bahnzugkraft Aufwickler	N

$F_{B,Rand,Ein}$	Bahnzugkraft der Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls an der Einlaufseite	N
$F_{B,Rand,Aus}$	Bahnzugkraft der Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls an der Auslaufseite	N
$\vec{F}_{Zug}$	Bahnzugkraft Zugwerk	N
F_{Haft}	Haftkraft	N
$F_{Haupt.AS}$	Kraft der Haupt-Zylinder auf der Antriebsseite	N
$F_{Haupt.BS}$	Kraft der Haupt-Zylinder auf der Bedienerseite	N
$F_{Kollektor,plastisch}$	Notwendige Kraft zur plastischen Verformung des Kollektors	N
F_N	Normalkraft	N
$F_{RB,AS}$	Kraft des RB-Zylinders auf der Antriebsseite	N
$F_{RB,BS}$	Kraft des RB-Zylinders auf der Bedienerseite	N
F_{res}	Resultierende Verdichtungskraft von der Kalanderwalze auf die Elektrode	N
$F_{Zustellung}$	Andruckkraft der unteren Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls an die oberen Rollen	N
g	Gravitation	m/s²
$G(i,j)$	Grün-Wert an der Stelle i,j in der Aufnahme	-
Δh	Höhenunterschied	mm
$\Delta h_{x,Ableiter}$	Höhenunterschied zwischen der Beschichtungskante und der maximalen Auslenkung des Ableiter in z-Richtung im KOS Elektrode quer zur Bearbeitungsrichtung	mm
$\Delta h_{x,Beschichtung}$	Höhenunterschied zwischen der Beschichtungskante und der maximalen Auslenkung des beschichteten Bereichs in z-Richtung im KOS Elektrode quer zur Bearbeitungsrichtung	mm
Δh_y	Höhenunterschied zwischen der minimalen und maximalen Auslenkung des beschichteten Bereichs in z-Richtung im KOS Elektrode in Bearbeitungsrichtung	mm
I	Einheitsmatrix	-
$\boldsymbol{K}$	Projektion von KOS Kamera n in die Bildebene	-

k_f	Fließspannung	Pa
k_w	Umformwiderstand	Pa
$k_{w,max}$	Maximaler Umformwiderstand	Pa
q_L	Linienlast	N/mm
L	Länge	mm
ΔL	Längenänderung	mm
$l_{Beschichtung,unkal}$	Abstand zweier Punkte auf der Beschichtung im unkalandrierten Zustand	mm
$l_{Beschichtung,kal}$	Abstand zweier Punkte auf der Beschichtung im kalandrierten Zustand	mm
$l_{Kollektor}$	Abstand zweier Punkte auf dem Kollektor	mm
M_B	Massenbeladung	g/cm²
M_{Brems}	Drehmoment der einlaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls	Nm
M_{Zug}	Drehmoment der auslaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls	Nm
$m_{Elektrode}$	Masse einer Stanzprobe der Elektrode	mg
$m_{Kollektor}$	Masse einer Stanzprobe des Kollektors	mg
m_S	Feststoffmasse	mg
o	Über MLP-Netz verarbeiteter Parameter	-
o_i	Eingangsgröße für das MLP-Netz	-
o_j	Ausgangsgröße des MLP-Netzes	-
p	Proportionalitätsfaktor	-
$\tilde{R}$	Rotationstensor	-
r_1, r_2	Radien der Abschälproben	mm
$R(i,j)$	Rot-Wert an der Stelle i,j in der Aufnahme	-
$\boldsymbol{R}_{2,1}$	Rotationsmatrix von KOS Kamera 2 in das KOS Kamera 1	-
$\boldsymbol{R}_{n,K}$	Rotationsmatrix von KOS Kamera n in das KOS Kalander	-

$RGBSum(i,j)$	Verrechnete R-, G- und B-Werte	-
$\boldsymbol{t}$	Verschiebung des KOS Kamera 2 zu KOS Kamera 1	-
t_1	Zeitpunkt unmittelbar vor dem Kalandrieren	s
t_2	Zeitpunkt zum Start des Kalandrierens	s
t_3	Zeitpunkt des Eingreifens der einlaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Modul	s
t_4	Zeitpunkt des Eingreifens der auslaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Modul	s
T_{KW}	Temperatur Kalanderwalze	°C
U	Verzerrungstensor	-
$\vec{u}$	Verschiebung im KOS Kalander	mm
$v_{Auslauf}$	Geschwindigkeit der auslaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls	m/min
V_B	Volumen der Beschichtung der Elektrode	m³
$v_{Einlauf}$	Geschwindigkeit der einlaufseitigen Rollen des Anti-Wrinkle-Moduls	m/min
v_{cal}	Kalandriergeschwindigkeit	m/min
v_{KW}	Geschwindigkeit Kalanderwalze	m/min
$v_{WG,y0}$	Geschwindigkeit des Walzguts vor dem Kalanderspalt	m/min
$v_{WG,y}$	Geschwindigkeit des Walzguts im Kalanderspalt	m/min
$v_{WG,y1}$	Geschwindigkeit des Walzguts nach dem Kalanderspalt	m/min
$v_{WG,a}$	Geschwindigkeit des Walzguts in der Gleitzone	m/min
$v_{WG,b}$	Geschwindigkeit des Walzguts in der Haftzone	m/min
$v_{WG,c}$	Geschwindigkeit des Walzguts in der Rückstauzone	m/min
w	Wrinkle-Parameter	-

$w_{i,j}$	Verbindungsgewicht	-
w_L	Wrinkle-Länge	mm
x	x-Achse der Elektrode	-
x_K	x-Achse des Kalanders	-
$\overrightarrow{x_{kal}}$	Ortskoordinate eines gedruckten Punktes auf der kalandrierten Elektrode im KOS Kalander	mm
$x_{Kalander}$	Kalanderparameter	-
$x_{SK,1}$	x-Achse der Kamera 1 des Stereokamerasystems	-
$\boldsymbol{X}_{SK,1}$	KOS der Kamera 1 des Stereokamerasystems	-
$x_{SK,2}$	x-Achse der Kamera 2 des Stereokamerasystems	-
$\boldsymbol{X}_{SK,2}$	KOS der Kamera 2 des Stereokamerasystems	-
$\boldsymbol{X}_{SK,n}$	KOS einer Kamera des Stereokamerasystems	-
$\overrightarrow{x_{unkal}}$	Ortskoordinate eines gedruckten Punktes auf der unkalandrierten Elektrode im KOS Kalander	mm
y	y-Achse der Elektrode	-
y_K	y-Achse des Kalanders	-
$y_{SK,1}$	y-Achse der Kamera 1 des Stereokamerasystems	-
$y_{SK,2}$	y-Achse der Kamera 2 des Stereokamerasystems	-
z	z-Achse der Elektrode	-
z_K	z-Achse des Kalanders	-
α_0	Eingriffswinkel Walzgut zu Walzenspalt	deg
β	Massenabhängigkeit	m²/s²
ε	Dehnung	-
ε_B	Porosität der kalandrierten Beschichtung	-

$\varepsilon_{Beschichtung,kal}$	Dehnung der Beschichtung einer Elektrode im kalandrierten Zustand	-
$\varepsilon_{Besch,plastisch}$	Plastischer Anteil der Dehnung der Beschichtung einer Elektrode im kalandrierten Zustand	-
$\varepsilon_{Kollektor}$	Dehnung des Kollektors	-
$\varepsilon_{B,0}$	Porosität der unkalandrierten Beschichtung	-
ε_x	Dehnung in x-Richtung im KOS Elektrode	-
ε_y	Dehnung in y-Richtung im KOS Elektrode	-
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Eigenwerte des Cauchy-Green-Deformationsgradienten	-
μ	Reibwert zwischen Walzgut und Walze	-
Π_E	Verdichtungsgrad	-
ρ	Dichte	g/cm³
ρ_A	Flächengewicht / Flächenmasse	g/cm²
$\rho_{B,0}$	Dichte der unkalandrierten Elektrode	g/cm³
$\rho_{B,i}$	Dichte der kalandrierten Elektrode	g/cm³
ρ_{Ziel}	Zieldichte der zu kalandrierenden Elektrode	g/cm³
ρ_S	Feststoffdichte	g/cm³
σ	Druckspannung	Pa
τ	Tortuosität	-