

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

Kamal Jonas Hussein

**Modellierung maschinenseitiger
Einflüsse auf den Vereinzelungs- und
Stapelbildungsprozess von Batteriezellen**

Band 305

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

Kamal Jonas Hussein

Modellierung maschinenseitiger Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess von Batteriezellen

Band 305

Modellierung maschinenseitiger Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess von Batteriezellen

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

Kamal Jonas Hussein

Tag der mündlichen Prüfung: 18.12.2025
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder

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	978-3-8191-0550-0
PDF-ISBN	978-3-8191-0601-9
ISSN	2944-6430
eISSN	2944-6449

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

Vorwort des Herausgebers

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

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen 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 Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Für die Betreuung meiner Arbeit als Hauptreferent, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die Möglichkeit, über mich selbst hinauszuwachsen, gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer. Für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder. Frau Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen für die wertvolle gemeinsame Zeit sowie die entstandenen Freundschaften bedanken. Ein besonderer Dank gilt hierbei Nils Schmidgruber, Ling Ma, Ann-Kathrin Wurba, Sebastian Henschel, Sebastian Schabel, Stefan Gartzke, Yann Rutschke, David Kraus, Hannes Weinmann, Benjamin Bold und Vivian Schiller. Weiterhin bedanke ich mich bei meinen zahlreichen studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ein besonderer Dank gilt hierbei Carlos, Farah, Lorenz, Niko, Lukas, Kai und Levin.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Johanna und Dr. Musa Kazem Hussein, die mich stets in meinen Entscheidungen unterstützt und mir meinen Weg erst ermöglicht haben.

Mein abschließender und tiefster Dank gilt meiner Partnerin Sabrina. Ohne ihre Geduld und ihren Rückhalt wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Karlsruhe, Dezember 2025

Kamal Jonas Hussein

Abstract

The transformation to electromobility represents a major challenge for production technology. Battery cells have to be produced in large quantities within a short period of time. Unclear trends in materials and battery cell designs complicate the development of production equipment and its operation. Insufficient knowledge of the interactions between materials, processes and machines leads to high scrap rates. In this context, the process steps of separation and stack assembly are considered to have high optimisation potential.

Intensive efforts are being made by research and industry to describe the battery production processes using models. The aim is to quantify interdependencies and derive optimisation approaches. This will enable processes to be operated more efficiently and scrap rates to be reduced. Much of this work involves modelling the material-side influences on the relevant processes. In order to be able to make a comprehensive statement on the cause-effect relationships, the modelling of the machine-side influences is also necessary.

This work makes a contribution to supplementing the modelling activities with the machine-side influences on the separation and stack assembly process. For this purpose, a methodical approach to model development, validation and application is presented.

Firstly, the processes are analysed and the machine-side influences on the corresponding error types are highlighted. This is followed by an in-depth analysis of the machine technology and the evaluation of the corresponding components within the machines. This finally determines which components need to be modelled with a high level of detail and which can be neglected. The concrete modelling and linking of sub-models is carried out as part of a system simulation. This is followed by the parameterisation of the submodels. The model quality is validated by means of experimental tests on the machines. Finally, corresponding application scenarios are presented. The potential to utilise the models in the phases of machine development, commissioning and operation is presented. When developing new separation and stacking machines, it will be possible to identify weak points at an early stage and analyse the influence of various components on process quality. The effects of setting parameters are shown in the context of commissioning. In this way, optimally adapted settings can be determined virtually for the material to be processed. The models are used in operation by coupling them with the real machine control system, which opens up new possibilities for using virtual sensors.

This work serves as a guideline for similar activities and is intended to support machine builders and cell manufacturers in developing their own models.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
Formelverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Technik und Forschung	5
2.1 Lithium-Ionen-Technologie: Aufbau, Funktionsweise und Materialien	5
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise	5
2.1.2 Materialien und beobachtbare Trends	6
2.1.3 Zelltypen und Verbundbauweisen	8
2.2 Industrieller Herstellungsprozess von Batteriezellen	9
2.2.1 Gesamtprozesskette und ausgewählte Prozessschritte	10
2.2.2 Vereinzeln und Stapeln – Prozess- und Maschinenteknik	14
2.3 Modellierungstätigkeiten im Kontext der Batterieproduktion	22
2.3.1 Modellklassifizierung und Ansätze für die Batterieproduktion	23
2.3.2 Modellierung von Produktionsmaschinen	28
2.4 Zusammenfassung und Ableitung des Forschungsdefizits	30
3 Zielstellung und Vorgehensweise	32
3.1 Zielstellung	32
3.2 Vorgehensweise	32
4 Aufgabendefinition und Systemanalyse	35
4.1 Aufgabendefinition	35
4.2 Systemanalyse	36
4.2.1 Vorstellung betrachteter Maschinen	36
4.2.2 Identifikation maschinenseitig beeinflusster Kennwerte	40
4.2.3 Maschinenanalyse	49

4.2.4	Zusammenfassung: Anforderungsdefinition und Systemanalyse	52
5	Modellierungsaspekte und Detaillierung	54
5.1	Identifikation und Bewertung der zu modellierenden Aspekte	54
5.2	Ableitung der Detaillierungsgrade	59
5.3	Zusammenfassung: Modellierungsaspekte und Detaillierung	64
6	Modellformalisierung	65
6.1	Modellierung der Einzelkomponenten	65
6.1.1	Materialbahnen	65
6.1.2	Mechanische Komponenten	68
6.1.3	Elektromechanische Komponenten	74
6.1.4	Pneumatische Komponenten	74
6.1.5	Elektrische Informationskomponenten	76
6.2	Struktureller Modellaufbau	76
6.2.1	Struktureller Modellaufbau des flexiblen Vereinzelungsmoduls	76
6.2.2	Struktureller Modellaufbau der Z-Falt-Stapelmaschine	80
6.3	Zusammenfassung: Modellformalisierung	83
7	Modellparametrierung	84
7.1	Recherche und Berechnung	84
7.2	Experimentelle Kennwertermittlung	86
7.2.1	Materialkennwerte	86
7.2.2	Rundlaufgenauigkeiten	99
7.3	Zusammenfassung: Modellparametrierung	101
8	Validierung der Modellgüte	103
8.1	Versuchsaufbauten und -pläne	103
8.1.1	Flexibles Vereinzelungsmodul	103
8.1.2	Z-Falt-Stapelmaschine	105
8.2	Versuchsergebnisse und Interpretation	106
8.2.1	Flexibles Vereinzelungsmodul	107
8.2.2	Z-Falt-Stapelmaschine	113

8.3	Zusammenfassung: Validierung der Modellgüte	117
9	Anwendungsszenarien	119
9.1	Anwendungsszenarien für das flexible Vereinzelungsmodul	119
9.1.1	Modellbasierte Ermittlung von Regelungsstrategien des Bahnzugs	119
9.1.2	Modellbasierte Analyse des Einflusses von Reglerparametern	122
9.1.3	Modellierte Einflüsse der Elektroden	124
9.1.4	Modellierte Einflüsse der Einstellparameter	125
9.2	Anwendungsszenarien für die Z-Falt-Stapelmaschine	129
9.2.1	Modellierte Einflüsse der Separatoren	130
9.2.2	Modellierte Einflüsse der Einstellparameter	131
9.3	Bahnführungssysteme: Modellerweiterung und Anwendung	134
9.4	Modellanwendung für den Maschinenbetrieb	139
9.5	Zusammenfassung: Anwendungsszenarien	142
10	Zusammenfassung und Ausblick	143
10.1	Zusammenfassung	143
10.2	Ausblick	145
11	Literaturverzeichnis	147
11.1	Liste eigener Veröffentlichungen	147
11.2	Liste verwendeter Literatur	148
Abbildungsverzeichnis		I
Tabellenverzeichnis		VII
Anhang		VIII

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
AF	Anwendungsfall
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DSM	Design Structure Matrix
EI	Elektrische Informationskomponente
EOL	End of Life
ESV	Elektrode-Separator-Verbund
FE	Finite Elemente
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
HMI	Human Machine Interface
IPC	Internationale Patentklassifikation
KI	Künstliche Intelligenz
LFP	Lithium-Eisenphosphat
M	Mechanische Komponente
MAT	Material
ME	Elektromechanische Komponente
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
NWA	Nutzwertanalyse
OPCUA	Open Platform Communications Unified Architecture
P	Pneumatische Komponente
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
ROM	Reduced Order Model

SEI	Solid Electrolyte Interphase
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Fläche	mm ²
AW	Auftretenswahrscheinlichkeit	-
B	Breite	mm
$B_{Besch.}$	Beschichtungsbreite	mm
$B_{Fol.,L}$	Folienbreite links	mm
$B_{Fol.,R}$	Folienbreite rechts	mm
B_{ges}	Gesamtbewertung	-
B_i	Einflussfähigkeit auf Kriterium i	-
BK	Bedeutsamkeit	-
d	Dicke	mm
$D_{Abwickler}$	Durchmesser des Abwicklers	mm
$d_{Besch.}$	Beschichtungsdicke	µm
$d_{Fol.}$	Foliendicke	µm
$d_{kal,mess}$	Kalandrierte Dicke (gemessen)	µm
$d_{kal,soll}$	Kalandrierte Dicke (soll)	µm
DSM_{aktiv}	Aktivsumme der DSM	-
d_{unkal}	Unkalandrierte Dicke	µm
E	E-Modul	GPa
EW	Entdeckungswahrscheinlichkeit	-
F	Kraft	N
F_A	Axialkraft	N
$F_{Bahn,k}$	Bahnzug im Bahnsegment k	N
F_{Bahn}	Bahnzug	N
$F_{Bahn,soll}$	Soll-Bahnzug	N
F_C	Coulomb'sche Reibungskraft	N
F_N	Normalkraft	N

F_R	Reibkraft	N
F_t	Tangentialkraft	N
F_v	Vorspannkraft	N
$F_{x,Gewicht}$	Gewichtskraft der Bahn in x-Richtung	N
$F_{x,i}$	Kraft in x-Richtung am Punkt i	N
$F_{y,Gewicht}$	Gewichtskraft der Bahn in y-Richtung	N
$F_{y,i}$	Kraft in y-Richtung am Punkt i	N
F_{zug}	Zugkraft	N
F_{zyl}	Zylinderkraft	N
G_i	Gewichtung eines Kriteriums i	%
I	Flächenträgheitsmoment	mm ⁴
J	Massenträgheitsmoment	kgmm ²
J_{Lager}	Massenträgheitsmoment Lager	kgmm ²
J_{Mantel}	Massenträgheitsmoment Mantel	kgmm ²
J_R	Massenträgheitsmoment Rolle	kgmm ²
K	Spannweitenparameter	1/mm
KD	Differentialbeiwert	-
KI	Integralbeiwert	-
KP	Proportionalbeiwert	-
$K_{R,L}$	Lager-Reibmoment	Nm
$K_{R,L,vis}$	Viskoser-Lager-Reibwertanteil	Nm/s
$L_{Bah,k}$	Länge eines Bahnsegments k	mm
$L_{Bahn,k,0}$	Ungedehnte Ausgangslänge eines Bahnsegments k	mm
L_{Sheet}	Zu vereinzelnde Elektrodenblattlänge	mm
m	Masse	kg
M_A	Antriebsmoment	Nm
$m_{Außenring}$	Masse des Lager Außenrings	kg
m_{Kugel}	Masse einer Kugel in einem Lager	kg

m_{Mantel}	Masse des Mantels	kg
N	Anzahl der Wertepaare	-
$n_{Abwickler}$	Drehzahl des Abwicklers	u/s
n_{ist}	Ist-Drehzahl	u/s
N_{Kugeln}	Anzahl der Kugeln in einem Lager	-
$NRMSE$	Normalized Root Mean Square Error	-
n_{soll}	Soll-Drehzahl	u/s
p	Druck	MPa
P_H	Spindelsteigung	mm
PID	Ausgang PID-Reglerelement	-
$P_{Tänzer}$	Druck im Pneumatikzylinder	MPa
R	Radius	mm
R_{Gas}	Allgemeine Gaskonstante	J/molK
$\vec{r}_i$	Positionsvektor des Punktes i	mm
$R_{L,a}$	Mittlerer Radius des Lager Außenrings	mm
$R_{M,a}$	Äußerer Mantelradius	mm
$R_{M,i}$	Innerer Mantelradius	mm
$RMSE$	Root Mean Square Error	mm
RPZ	Risikoprioritätszahl	-
R_{vis}	Viskoser Reibungskoeffizient im Bahnmaterial	kg/s
s	Standardabweichung	-
v_{Bahn}	Bahngeschwindigkeit	mm/s
$\vec{v}_i$	Geschwindigkeitsvektor des Punktes i	mm/s
V_{kal}	Kalandriergrad	%
v_{rel}	Relative Geschwindigkeit zwischen Bahn und Rolle	mm/s
$v_{R,x}$	Geschwindigkeit um den Rollenmittelpunkt in x-Richtung	mm/s
$v_{R,y}$	Geschwindigkeit um den Rollenmittelpunkt in y-Richtung	mm/s

v_t	Tangentialgeschwindigkeit	mm/s
$v_{t,HHS}$	Tangentialgeschwindigkeit am Handhabungssystem	mm/s
v_{Tisch}	Mittlere Tischgeschwindigkeit	mm/s
$v_{x,i}$	Geschwindigkeit in x-Richtung an Position i	mm/s
$v_{y,i}$	Geschwindigkeit in y-Richtung an Position i	mm/s
x_i	x-Position des Punktes i	mm
y_i	y-Position des Punktes i	mm
z_{aus}	Laterale Verschiebung der auslaufenden Bahnkante	mm
z_{ein}	Laterale Verschiebung der einlaufenden Bahnkante	mm
z_L	Verstellweg	mm
β	Umschlingungswinkel	°
ϵ	Exzentrizität der Rolle	mm
$\varepsilon_{Bahn,k}$	Dehnung im Bahnsegment k	mm
η_{LF}	Wirkungsgrad Linearführung	%
η_S	Wirkungsgrad der Spindel	%
κ	Isentropenexponent	-
λ_i	Wert i der Simulationsdaten	N
$\hat{\lambda}_i$	Wert i der Validierungsdaten	N
μ	Reibungskoeffizient	-
μ_{dyn}	Dynamischer Gleitreibungskoeffizient	-
$\mu_{R,L}$	Lagerreibwert	-
μ_{Roll}	Rollreibungswert	-
μ_{stat}	Statischer Haftreibungskoeffizient	-
$\mu_{visc,Luft}$	Viskoser Reibkoeffizient von Luft	Ns/m
$\sigma_{Bahn,k}$	Bahnspannung im Bahnsegment k	MPa
τ	Zeitkonstante	s
$\bar{\tau}$	Mittelwert	-

τ_i	Datenpunkt	-
$\tau_{s,i}$	Standardisierter Datenpunkt	-
θ_R	Drehwinkel der Rolle	°
ω_R	Winkelgeschwindigkeit der Rolle	1/s

1 Einleitung

1.1 Motivation

Vor dem Hintergrund der Transformation hin zur Elektromobilität gelten Lithium-Ionen-Batterien nach wie vor als Schlüsseltechnologie für mobile Energiespeichersysteme (Stampatori et al. 2020). Für die nächsten Jahre wird ein signifikant ansteigender Bedarf an Lithium-Ionen-Batterien prognostiziert. So wird bis zu dem Jahr 2030 ein weltweiter Bedarf von ca. 3 590 GWh an benötigter Zellkapazität vorhergesagt, wovon etwa 943 GWh für den Standort Europa abgeschätzt werden (Neuhausen et al. 2022). Entsprechende Produktionskapazitäten (Maschinen, Anlagen, Personal und Material) müssen zur Deckung der prognostizierten Bedarfe durch die Zellhersteller bereitgestellt werden.

Neben dem allgemeinen schnell ansteigenden Bedarf an zu produzierender Batteriezellkapazität lassen sich weitere Trends hinsichtlich der Batterieentwicklung beobachten. So existieren stetige Bestrebungen, die Batteriezelleigenschaften hinsichtlich Energie- und Leistungsdichten, Sicherheit und Lebensdauer zu optimieren. Diese Bestrebungen resultieren im Wesentlichen in der Weiter- und Neuentwicklung von Materialsystemen, Zelldesigns und Produktionsprozessen. (Link et al. 2023; Michaelis et al. 2023)

Diese Trends stellen sowohl für Maschinen- und Anlagenbauer als auch für Zellhersteller eine große Herausforderung dar. Die Entwicklung neuer Produktionsanlagen wie auch deren Inbetriebnahme, Einrichtung und Betrieb werden hierdurch erschwert. So sehen sich Maschinenbauer damit konfrontiert, hochproduktives und zum Teil flexibel nutzbares Produktionsequipment bereitzustellen. Die Zellhersteller sehen sich gezwungen, das Produktionsequipment angesichts der zu erwartenden Volatilität im Kontext der Trends der Batterieentwicklung effizient zu betreiben. Die sich stetig ändernden Randbedingungen resultieren vor allem in hohen Materialausschussraten. So können diese, abhängig von der Produktionsphase, in einem höheren zweistelligen prozentualen Bereich liegen (Wessel et al. 2021). Ausschlaggebend hierfür ist fehlendes Verständnis der Wirkzusammenhänge zwischen Material, Prozess, Maschinenverhalten und resultierenden Produkteigenschaften. (Husseini et al. 2022b; Aydemir 2021; Weinmann 2022)

Vor allem sind die Prozesse der Vereinzelung und Stapelbildung von einer hohen Diversität an Maschinenkonzepten gekennzeichnet. Dies liegt nicht zuletzt an der Vielzahl unterschiedlicher Elektrode-Separator-Verbundbauweisen (ESV) und der stetigen Entwicklung neuer Maschinenkonzepte mit dem Ziel der Produktivitätssteigerung (Aydemir 2021; Bach 2017). Der Vereinzelung und Stapelbildung werden insgesamt hohe Optimierungspotenziale zugesprochen. Jedoch sind hier insbesondere die Neuentwicklung von Maschinen, deren Inbetriebnahme und das Einrichten bei Material- oder Formatwechsel aufgrund der unzureichenden Kenntnisse über die Wirkzusammenhänge erschwert. (Husseini et al. 2022a)

Um diese Wirkzusammenhänge zu quantifizieren werden seitens Forschung und Industrie entsprechende Anstrengungen unternommen, diese mittels Modellen zu beschreiben. So ist es notwendig, sowohl die materialseitigen als auch die maschinenseitigen Einflüsse auf die Produktionsprozesse und Produkteigenschaften zu betrachten. Ein Großteil der bisherigen Aktivitäten bezieht sich vorwiegend auf die Modellierung materialseitiger Einflüsse auf die Produktionsprozesse der Batterie. Vor dem Hintergrund der genannten Diversität an Maschinenkonzepten, der Neuentwicklungen und des allgemeinen Optimierungspotenzials ist es notwendig, entsprechende Modelle zum Maschinenverhalten und zu dessen Auswirkungen auf den Produktionsprozess zu entwickeln und bereitzustellen.

Zusammengefasst bedarf es der Entwicklung und Bereitstellung von Modellen zur Beschreibung der maschinenseitigen Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess. Hierdurch können Optimierungspotenziale bei der Neuentwicklung von Maschinen, bei deren Inbetriebnahme und Einrichtung im Falle von Material- oder Formatwechsel und schlussendlich beim Betrieb erschlossen werden.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Vor dem Hintergrund der dargestellten Motivation ist das Ziel dieses Vorhabens die Entwicklung von geeigneten Modellen zur Beschreibung maschinenseitiger Einflüsse auf die Prozessschritte der Vereinzelung und Stapelbildung. Der Anspruch dieser Arbeit liegt in der Ausarbeitung einer generalisierten Methode zum Aufbau von Maschinenmodellen für Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesse in der Batterieproduktion. Zudem ist sicherzustellen, dass die Nutzung der Modelle die Ableitung von Optimierungsansätzen für die Phasen der Maschinenentwicklung, der Inbetriebnahme und des Betriebs ermöglicht. Hierdurch soll ein Beitrag geleistet werden, die durch Forschung und

Industrie getriebenen materialseitigen Modellierungstätigkeiten durch entsprechende Maschinenmodelle zu ergänzen. Darüber hinaus soll das Verständnis von Wirkzusammenhängen gestärkt werden. Entsprechende Kostensenkungspotenziale sollen hierdurch erschlossen werden können. Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Arbeiten beziehen sich vorwiegend auf die Maschinen und Anlagen zur Vereinzelung und Stapelbildung des *wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*. Die Generalisierbarkeit der dargestellten Methodik und Vorgehensweise für Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesse steht jedoch im Vordergrund und soll gewährleistet werden.

In Kapitel 2 wird der Stand der Technik und Forschung der Batterieproduktion dargestellt. Ein entsprechender Fokus wird hierbei auf die Prozesse der Vereinzelung und Stapelbildung und deren Maschinenteknik gelegt. Die aktuellen Modellierungstätigkeiten werden dargestellt und das Forschungsdefizit wird abgeleitet.

Kapitel 3 fasst die Zielstellung zusammen und gibt einen detaillierten Überblick über die Vorgehensweise dieser Arbeit.

In Kapitel 4 erfolgen eine Aufgabendefinition und Systemanalyse. Hierbei wird zunächst festgehalten, welche Aufgaben die zu entwickelnden Modelle erfüllen müssen. Insgesamt werden dabei drei Anwendungsfälle definiert. Hierbei handelt es sich um die Verwendung der Modelle zur Optimierung des Entwicklungsprozesses neuer Maschinen, deren Inbetriebnahme respektive Einrichtung sowie den Betrieb. Aufbauend hierauf erfolgen die Vorstellung und Analyse der betrachteten Maschinen und von deren Einflüssen auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess.

In Kapitel 5 erfolgt die methodische Herleitung der zu modellierenden Aspekte der Maschinen und Prozesse. Dem schließen sich die Bewertung der einzelnen Aspekte und die Ableitung der Detaillierungsgrade an.

Im Rahmen von Kapitel 6 erfolgt die Modellformalisierung. Hierbei werden, aufbauend auf den erarbeiteten Detaillierungsgraden, entsprechende Teilmodelle und Schnittstellen definiert und gesamtheitliche Maschinen-/Prozessmodelle entwickelt.

In Kapitel 7 wird eine Parametrierung der formalisierten Teilmodelle vorgenommen. Hierbei werden entsprechende Kennwerte der Parameter der Teilmodelle ermittelt. Die Ermittlung erfolgt durch Recherche, Berechnung und eine experimentelle Vorgehensweise.

In Kapitel 8 wird die Modellgüte anhand gezielter Versuchsreihen validiert. Hierdurch wird die Aussagefähigkeit der entwickelten Modelle erschlossen und es werden entsprechende Schwachstellen aufgedeckt.

Kapitel 9 beleuchtet konkrete Möglichkeiten zur Nutzung der entwickelten und validierten Modelle. Diese Szenarien stehen in Bezug zu den in Kapitel 4 beschriebenen Anwendungsfällen.

In Kapitel 10 wird eine Zusammenfassung der Arbeit gegeben und als Ausblick auf mögliche Folgetätigkeiten eingegangen.

2 Stand der Technik und Forschung

In dem nachfolgenden Kapitel wird eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik und Forschung im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien bereitgestellt, einschließlich der Produktionsprozesse und Modellierungstätigkeiten. Im Fokus stehen hierbei die Prozesse der Vereinzelung und Stapelbildung. Weiterhin werden die damit verbundenen Produktionsmaschinen und Modellierungs- bzw. Simulationsansätze diskutiert.

2.1 Lithium-Ionen-Technologie: Aufbau, Funktionsweise und Materialien

Im Folgenden wird auf die Lithium-Ionen-Technologie eingegangen. Hierbei werden zunächst der Aufbau und die Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batteriezelle dargestellt. Darauf aufbauend werden die relevanten materialseitigen Trends aufgezeigt und die unterschiedlichen Verbundbauweisen und Zelltypen veranschaulicht.

2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Lithium-Ionen Batterien sind wiederaufladbare elektrochemische Speicher und haben sich für diverse Anwendungen aus dem *Consumer-Electronics*-Bereich (Smartphones, Laptops, Kopfhörer ...), für *Powertools* und in der Elektromobilität als geeignete Energiespeicher bewährt (Kurzweil & Dietlmeier 2018).

Die Abbildung 2-1 illustriert schematisch das kleinste Element (galvanische Zelle) einer Lithium-Ionen-Batterie und dessen Entladevorgang. Der Aufbau einer galvanischen Zelle besteht im Wesentlichen aus den Elektroden, der Anode und der Kathode, dem elektrisch isolierenden Separator und einem Ladungsträger, dem Elektrolyten. Die Elektroden wiederum bestehen aus einer elektrisch leitenden Stromsammlerfolie und einem Aktivmaterial. Die Namenskonvention der Elektroden richtet sich in dieser Arbeit nach dem Entladevorgang (vgl. Abbildung 2-1). Die positiv geladene Elektrode wird als Kathode und die negativ geladene Elektrode wird als Anode bezeichnet. Die Stromsammlerfolie der Anode besteht in der Regel aus Kupfer, die der Kathode aus Aluminium. Das Aktivmaterial der Anode ist vorwiegend Graphit. Das Aktivmaterial der Kathode ist ein Lithium-Metall-Oxid. (Doppelbauer 2020; Leuthner 2013)

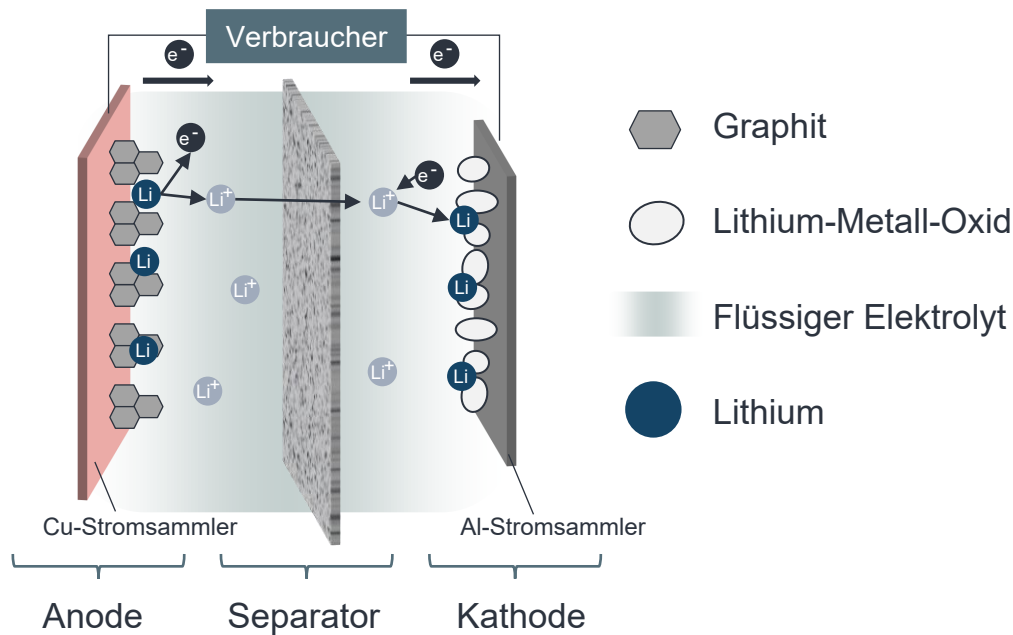


Abbildung 2-1: Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batteriezelle (in Anlehnung an (Leuthner 2013))

Die Funktionsweise der Zelle ist durch den Ablauf einer Redoxreaktion und einer damit verbundenen Interkalation und Deinterkalation von Lithium-Ionen in die Wirkstrukturen der Anode und Kathode gekennzeichnet. Beim Entladevorgang deinterkalieren folglich Lithium-Ionen aus der Graphitstruktur der Anode. Über den Ionen-leitfähigen Elektrolyten gelangen die Lithium-Ionen durch den Ionen-permeablen Separator zu der Kathode. Dort interkalieren diese in die Wirkstruktur der Kathode. Um eine entsprechende Ladungsneutralität zu erreichen, bewegt sich eine gleiche Anzahl frei werdender Elektronen über die Stromsammler der Elektroden und den Verbraucher zurück zu den Lithium-Ionen in die Wirkstruktur der Kathode. (Vuorilehto 2013; Weinmann 2022)

2.1.2 Materialien und beobachtbare Trends

Im Folgenden wird auf die verwendeten Materialien der Elektroden und des Separators eingegangen. Darauf aufbauend werden die materialseitigen beobachtbaren Trends erläutert. Für die weiterführenden Betrachtungen dieser Arbeit sind die Elektroden und der Separator von Relevanz. Auf den Elektrolyten wird daher nicht weiter eingegangen.

2.1.2.1 Elektroden

Wie in Kapitel 2.1.1 bereits dargestellt, setzen sich die Elektroden jeweils aus einer Stromsammlerfolie und dem Aktivmaterial zusammen. Die Aktivmaterialien werden zu-

nächst in einem Mischprozess mit entsprechenden Additiven (Binder, Leitrüße) zu einem Slurry aufbereitet und durch einen Beschichtungs- und anschließenden Trocknungsprozess auf die Stromsammelrfolien aufgebracht (Kampker 2014). Für die Kathode haben sich mehrere Materialsysteme in der Praxis etabliert. Hierbei sind insbesondere Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Kathoden (NMC), Lithium-Eisenphosphat-Kathoden (LFP) und Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Kathoden (NCA) als Aktivmaterial am Markt zu finden (Andre et al. 2015). Die Verwendung der Materialien hängt hierbei vor allem vom Anforderungsbereich ab. So haben Batterien auf NMC-Basis meist eine vergleichsweise hohe Energiedichte und Batterien auf LFP-Basis eine höhere Zyklenstabilität (Wu et al. 2020). Das Aktivmaterial auf der Anodenseite besteht in der Regel aus Graphit (Du et al. 2023).

Für die Elektroden lassen sich Optimierungstrends erkennen. Hier wird insbesondere darauf abgezielt, die volumetrische Energiedichte der Batteriezelle zu erhöhen (Boyce et al. 2021). Diese Bestrebungen resultieren in der Erhöhung der Beschichtungsdicken und Verdichtungsgrade und in der Verringerung der Folienstärken der Stromsammelr. Aktuelle Trockenschichtdicken der Elektroden reichen von 50 μm bis 100 μm . Aktuelle Stärken von Stromsammelrfolien der Anoden liegen zwischen 6 μm und 15 μm und für Kathoden zwischen 10 μm und 20 μm . (Weinmann 2022)

Diese Trends wirken sich auf die automatisierten Herstellungsprozesse aus. So sind insbesondere die bahnführenden Prozesse beim Vereinzelungsprozess von den geringer werdenden Folienstärken betroffen. Das beschädigungsfreie Handhaben und die Regelung von Bahnzügen der Elektrodenbahnen wird hierdurch erschwert. (Husseini et al. 2022a).

2.1.2.2 Separatoren

Der Separator hat die Aufgabe, die Elektroden räumlich voneinander zu trennen, um elektrische Kurzschlüsse zu vermeiden. Weiterhin ermöglicht der Separator den Austausch von Ionen (Zhang 2007). Separatoren werden in drei Kategorien eingeteilt. Hierbei handelt es sich um (1) mikroporöse Polymer-Membran-Separatoren, (2) Vliesstoff-Separatoren und (3) anorganische Composit-Separatoren. Die mikroporösen Polymer-Membran-Separatoren sind charakterisiert durch eine vergleichsweise geringe Folienstärke und geringe thermische Sicherheit. Die Vliesstoff-Separatoren zeichnen sich durch eine hohe Porosität und geringe Kosten aus. Die anorganischen Composit-Separatoren sind durch eine gute Benetzbarkeit durch den Elektrolyten und eine hohe

thermische Stabilität gekennzeichnet (Zhang 2007). Etabliert haben sich insbesondere Polymermembran-Separatoren aus Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) sowie Vliesstoff-Separatoren (Zhang 2007). Um die thermische Stabilität und Benetzbarkeit zu optimieren, wird oftmals eine einseitige oder doppelseitige keramische Beschichtung auf den Separator aufgebracht (Shi et al. 2017). Der Separator gehört zu den inaktiven Materialien einer Lithium-Ionen-Batterie und hat keinen direkten Einfluss auf die Zellkapazität. Somit existieren auch hier Bestrebungen die Folienstärken zu reduzieren, um somit die Energiedichten zu erhöhen (Zhu et al. 2021). Aktuelle Folienstärken von Separatoren liegen zwischen 7 μm und 25 μm (Deimede & Elmasides 2015).

2.1.3 Zelltypen und Verbundbauweisen

Zelltypen bzw. Zellbauformen beschreiben das Gehäuse, in das der Zellverbund eingebracht wird (Bach 2017). Die gängigsten Zelltypen sind hierbei die Rundzelle, prismatische Zelle und die Pouch-Zelle (Haag 2020). Die Abbildung 2-2 illustriert die drei Zelltypen.

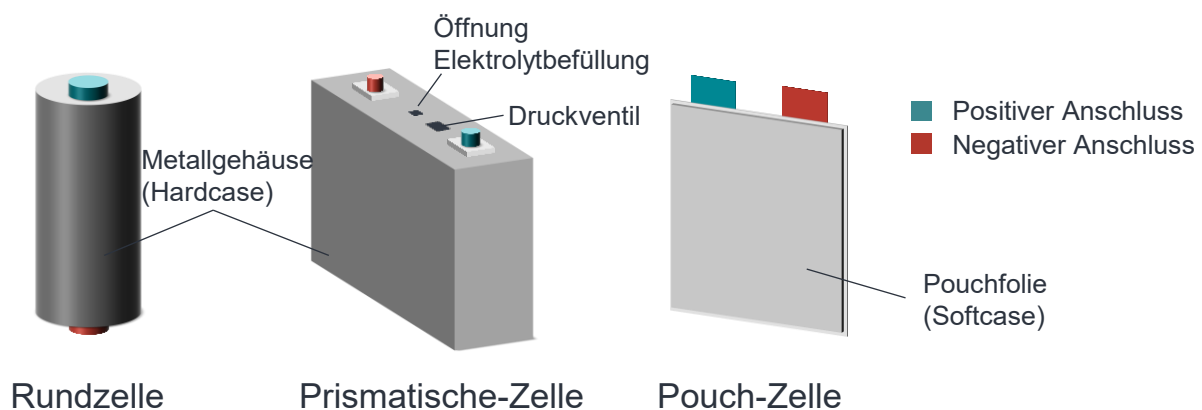


Abbildung 2-2: Vereinfachte Darstellung der Zelltypen (in Anlehnung an (Bach 2017))

Die Rund- und prismatische Zelle sind durch ein hartes Metallgehäuse charakterisiert. In das Gehäuse der prismatischen Zelle sind eine Öffnung zur Elektrolytbefüllung und ein Druckventil integriert. Da es innerhalb der Zelle zu chemischen Gasbildungsprozessen kommen kann, fungiert das Ventil als Sicherung gegen Überdruck. Die Pouch-Zelle hingegen besteht aus zwei tiefgezogenen Halbschalen, in welche der ESV eingebracht wird. Die Halbschalen bestehen aus Aluminium, welche mit PP, PA und PET beschichtet sind (Schmidgruber et al. 2024). Die Gegenüberstellung der drei Zelltypen hinsichtlich Kriterien wie Energiedichten, Lebensdauer und Kosten ist Bestandteil diverser Un-

tersuchungen. Hierbei werden die Schlussfolgerungen von dem entsprechenden Kontext und Betrachtungsfokus beeinflusst. Die Auswahl des zu verbauenden Zelltyps hängt im Wesentlichen von einer Abwägung der kritischsten Anforderungen ab, welche das Gesamtsystem und der jeweilige Anwendungsfall an den Zelltyp stellen. (Weinmann 2022)

Neben den Zelltypen beschreibt die Verbundbauweise die konkrete Struktur der Elektroden und des Separators innerhalb einer Zelle. Im Allgemeinen werden Verbundbauweisen nach der Verwendung des Separators in drei übergeordnete Kategorien eingeteilt. Hierbei handelt es sich um die gewickelte Verbundbauweise, die gestapelte Verbundbauweise und die gefaltete Verbundbauweise (Mooy 2019). Die Abbildung 2-3 veranschaulicht die übergeordneten Verbundbauweisen.

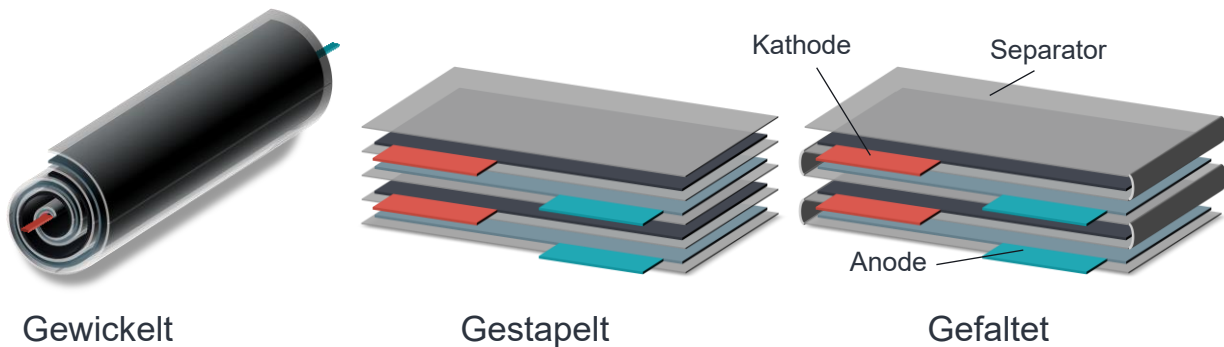


Abbildung 2-3: Vereinfachte Darstellung der Verbundbauweisen (in Anlehnung an (Mooy 2019))

Die gewickelte Verbundbauweise ist hauptsächlich durch einen ununterbrochenen spiralförmigen Strukturaufbau des Separators charakterisiert. Bei der gestapelten Verbundbauweise liegen sowohl die Elektroden als auch der Separator als konfektionierte Einzelblätter vor, welche sequenziell gestapelt werden. Die gefaltete Verbundbauweise ist gekennzeichnet durch einen mäanderförmigen, ebenen, sequenziell gefalteten Verlauf des Separators. (Bach 2017; Mooy 2019)

In Abhängigkeit von den Herstellungsverfahren und dem Anwendungsfall kann in der praktischen Anwendung eine Vielzahl an Subgruppen von Verbünden zu den dargestellten Verbundbauweisen identifiziert werden. (Weinmann 2022)

2.2 Industrieller Herstellungsprozess von Batteriezellen

Im folgenden Kapitel wird der industrielle Herstellungsprozess von Batteriezellen anhand der Gesamtprozesskette und ausgewählter Prozessschritte vorgestellt. Der Fokus

liegt auf gestapelten bzw. gefalteten Verbundbauweisen. Insbesondere wird die Maschinenteknik für die Prozessschritte der Vereinzelung und Stapelbildung vertieft.

2.2.1 Gesamtprozesskette und ausgewählte Prozessschritte

Die Abbildung 2-4 veranschaulicht die Gesamtprozesskette zur Herstellung von Pouch-Zellen. Bisher werden die Batterieproduktionsschritte in der Literatur im Kontext einer zeitlichen Abfolge in drei übergeordnete Prozessschritte eingeteilt. Diese sind die Elektrodenproduktion, das Assemblieren und das Zellfinishing (unterer Teil der Abbildung 2-4).

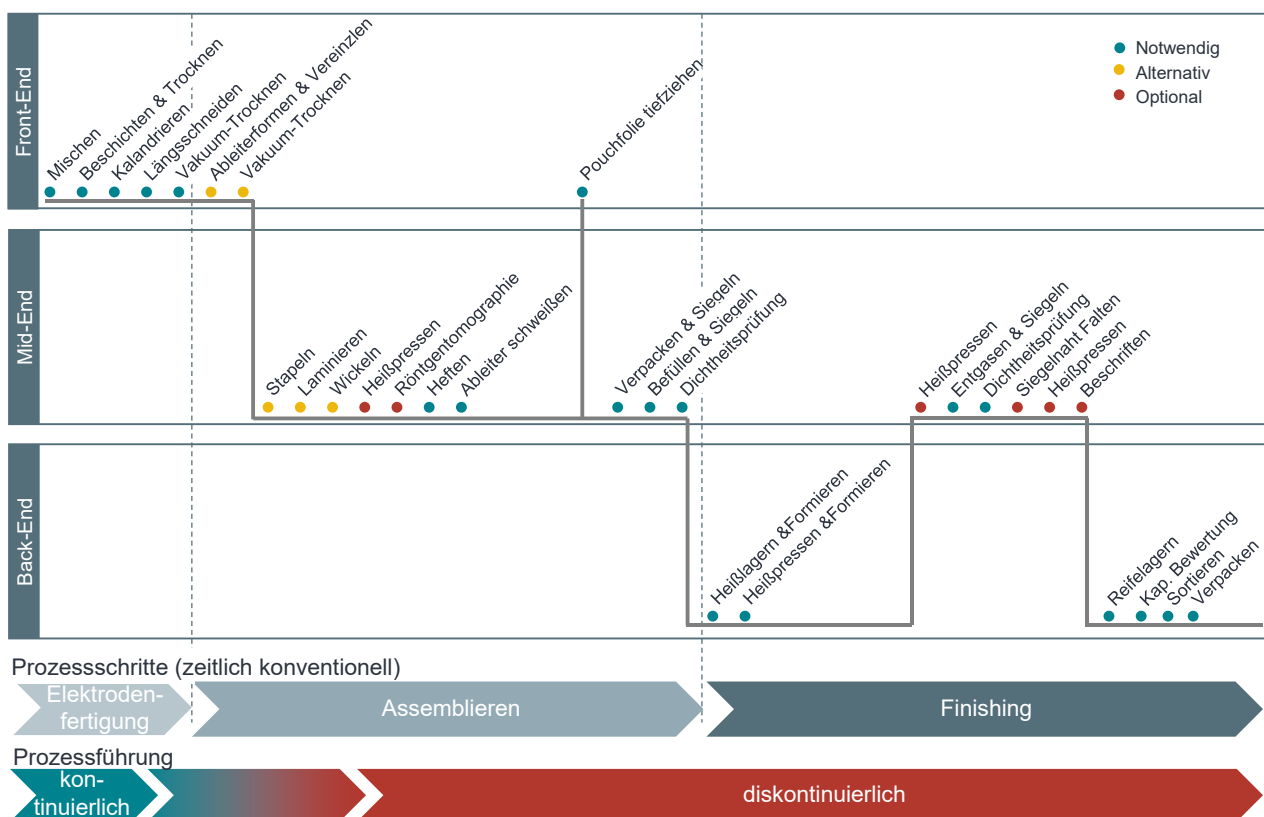


Abbildung 2-4: Beispielhafte Gesamtprozesskette zur Herstellung von Pouch-Zellen (in Anlehnung an (Kampker et al. 2015; Weinmann 2022))

In der industriellen Praxis wird nach (Weinmann 2022) oftmals eine Einteilung der Prozessschritte in die Bereiche Front-, Mid- und Back-End vorgenommen. Diese Klassifikation impliziert keine zeitliche Abfolge der Prozessschritte. Unter Front-End werden die Prozesse eingeordnet, in denen die Grundbestandteile der Zelle hergestellt werden. Hierzu zählen beispielsweise die Elektrodenfertigung und die Herstellung des Pouchgehäuses. Mid-End umfasst die Prozessschritte, bei denen diese Bestandteile zusam-

mengeführt und die eigentliche Zelle gefertigt wird – etwa im Rahmen des Stapelbildungsprozesses. Unter Back-End werden die abschließenden Produktionsschritte verstanden, wie etwa die chemische Aktivierung der Zelle (Formierung) und die Reifelagerung. Hierdurch ist eine widerspruchsfreie Einordnung der einzelnen Schritte möglich. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Prozessschritte vorgestellt.

2.2.1.1 Beschichten und Trocknen

Dem Beschichtungsprozess werden der im Mischprozess hergestellte Elektrodenslurry und die jeweiligen Stromsammelrfolien zugeführt. In der Praxis haben sich unterschiedliche Beschichtungsverfahren etabliert. Dazu zählt das Beschichten mittels Rakel, Schlitzdüse, Kaskadendüse und Rasterwalzenauftragssystem (Kampker 2014). Für industrielle Anwendungen ist das Auftragen des Aktivmaterials mittels Schlitzdüse aufgrund höher realisierbarer Prozessgeschwindigkeiten ein weit verbreitetes Verfahren (Schmitt et al. 2014). Die Qualität der Beschichtung wird im Wesentlichen durch eine homogene Beschichtungsdicke und einen präzisen Überdeckungsgrad bei beidseitig beschichteten Stromsammelrfolien bestimmt. Insbesondere sind hier Überhöhungseffekte an den Randbereichen der Beschichtung zu minimieren. (Diehm et al. 2020)

Der Trocknungsprozess findet in der Regel unmittelbar nach dem Beschichtungsprozess in der gleichen Anlage statt. Technologisch kommen hier vor allem konvektive Trocknungssysteme zum Einsatz. Ein Ziel des Trocknungsprozesses liegt darin, entsprechende Trocknungsraten bei gleichbleibender Qualität zu erhöhen, da die Maschinenausbringung i. d. R. durch diese limitiert ist. (Weinmann 2022; Zhang et al. 2022)

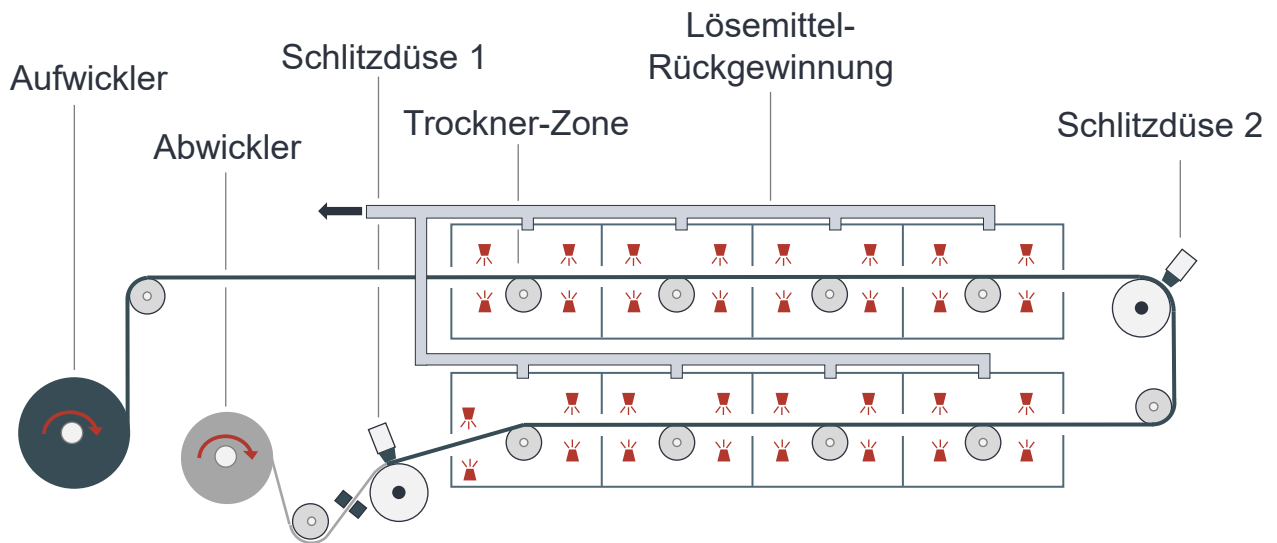


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Beschichtungs- und Trocknungsprozesses (in Anlehnung an (Weinmann 2022))

Die Abbildung 2-5 veranschaulicht beispielhaft den Beschichtungs- und Trocknungsprozess einer beidseitig kontinuierlich beschichteten Elektrode. Hierbei wird zunächst die zu beschichtende Folie abgewickelt und unter der ersten Schlitzdüse hindurchgeführt. Die Beschichtung erfolgt auf der ersten Seite der Bahn. Das beschichtete Material wird anschließend durch die erste Trocknerstrecke geführt. Nachdem das Material getrocknet ist, wird die Folie umgelenkt. Auf die zweite, unbeschichtete Seite wird nun über eine zweite Schlitzdüse das Aktivmaterial aufgetragen und die Folie wird erneut durch eine Trocknerstrecke geführt. Abschließend wird die beschichtete und getrocknete Folie zu einem Coil aufgewickelt.

2.2.1.2 Kalandrieren

Der Zweck des Prozessschrittes des Kalandrierens ist die Erhöhung der volumetrischen Energiedichte der Batteriezelle, Erhöhung der Homogenität und Verbesserung der mechanischen Eigenschaften mittels eines Verdichtungsprozesses (Bold & Fleischer 2018). Abbildung 2-6 veranschaulicht schematisch den industriellen Kalandrierprozess.

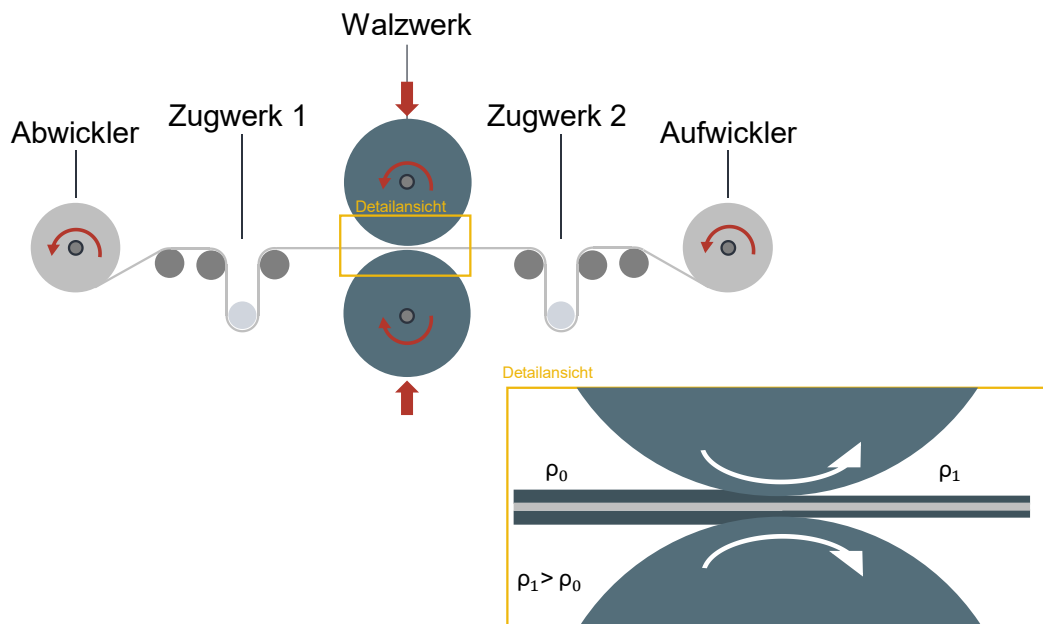


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des Kalandrierprozesses (in Anlehnung an (Meyer et al. 2017))

Das beschichtete und getrocknete Material wird mittels eines Antriebs vom Coil abgewickelt und über das erste Zugwerk zum Walzwerk geführt. In den Zugwerken wird die auf die Bahn wirkende Zugkraft vor und nach dem Verdichtungsprozess eingestellt. Das Walzwerk fungiert hierbei als Klemmstelle. Im Walzwerk selbst erfolgt der Kalandrierprozess. Hierbei wird das beschichtete Material durch ein Walzenpaar geführt. Auf das Walzenpaar wird über Hydraulikzylinder eine Kraft aufgebracht. Das verdichtete Material wird abschließend wieder über entsprechende Antriebe zu einem Coil aufgewickelt. (Bold & Fleischer 2018; Meyer et al. 2017)

Die Zwischenprodukteigenschaften aus dem Kalandrierprozess wirken sich in besonders hohem Maße auf die nachfolgenden Prozessschritte aus, so auch auf das Vereinzeln und die Stapelbildung. Beim Kalandrieren wird die Stromsammelfolie unter dem zu verdichtenden Bereich plastisch verformt. Der unbeschichtete Bereich der Folie erfährt hingegen keine Belastung. Abhängig von dem Kalandriergrad kann es hier zu einer mechanischen Spannungsdifferenz kommen, welche zu geometrischen Abweichungen in dem kalandrierten Material führt. So können hier entsprechende Welligkeiten in der kalandrierten Elektrodenbahn oder Falten in den Randbereichen auftreten. Diese Eigenschaften wirken sich beispielsweise auf nachfolgende Bahnführungsprozesse bei der Vereinzelnung aus. So besteht hier die Möglichkeit, dass es zu Ungenauigkeiten in der Maßhaltigkeit vereinzelter Elektrodenblätter kommt oder Probleme in der

Handhabung der Blätter auftreten. (Bold 2023; Günther et al. 2020; Mayer et al. 2023a; Mayer et al. 2021)

2.2.2 Vereinzeln und Stapeln – Prozess- und Maschinentechnik

Dieses Kapitel beleuchtet die Prozessschritte Vereinzeln und Stapeln. Hierbei wird zunächst auf die allgemeine Prozessführung eingegangen und die relevantesten Qualitätsparameter werden herausgestellt. Anschließend werden Auszüge der verwendeten Maschinentechnik dargestellt.

2.2.2.1 Allgemeine Prozessführung und Qualitätsmerkmale

Im Folgenden werden die für die Herstellung einer gestapelten bzw. gefalteten Zelle notwendigen Prozessschritte der Vereinzelung und Stapelbildung beleuchtet. Da in der industriellen Praxis oftmals die Vereinzelungs- und Stapelprozesse eng verkettet in einer Anlage stattfinden, werden die Prozesse an dieser Stelle gemeinsam betrachtet.

In der Abbildung 2-7 sind die Vereinzelung und Stapelbildung schematisch für einen möglichen ESV dargestellt. Die beschichteten, getrockneten und kalandrierten Elektroden werden den Prozessen als Bahn zugeführt. Zunächst erfolgt das sog. *Notching* bzw. Ableiterformen der Elektrodenbahnen. Beim *Notching* werden aus den beschichteten Stromsammelrfolien der Elektroden einzelne Ableiterfähnchen und eine Dreiecksnut ausgeformt. Die Ableiterfähnchen dienen der späteren Kontaktierung der Elektroden. Die Nut markiert den Bereich, an welchem die einzelnen Elektrodenblätter in einem nachfolgenden Schritt abgelängt werden. Unter dem Ablängen versteht man im Wesentlichen das Trennen einzelner Elektrodenblätter aus der Bahn. Anschließend werden abhängig von Prozessführung und Maschine die Elektrodenblätter magaziniert. Die einzelnen Blätter werden danach auf einer Ausrichteinheit, entweder über mechanische Anschläge oder mittels Kamerasystem, exakt positioniert. Von der Ausrichteinheit werden die Elektrodenblätter dann alternierend mit dem zugeführten Separator (entweder als vereinzelter Blätter oder als Bahn) zu einem Verbund aufgebaut. (Baumeister 2017; Weinmann 2022)

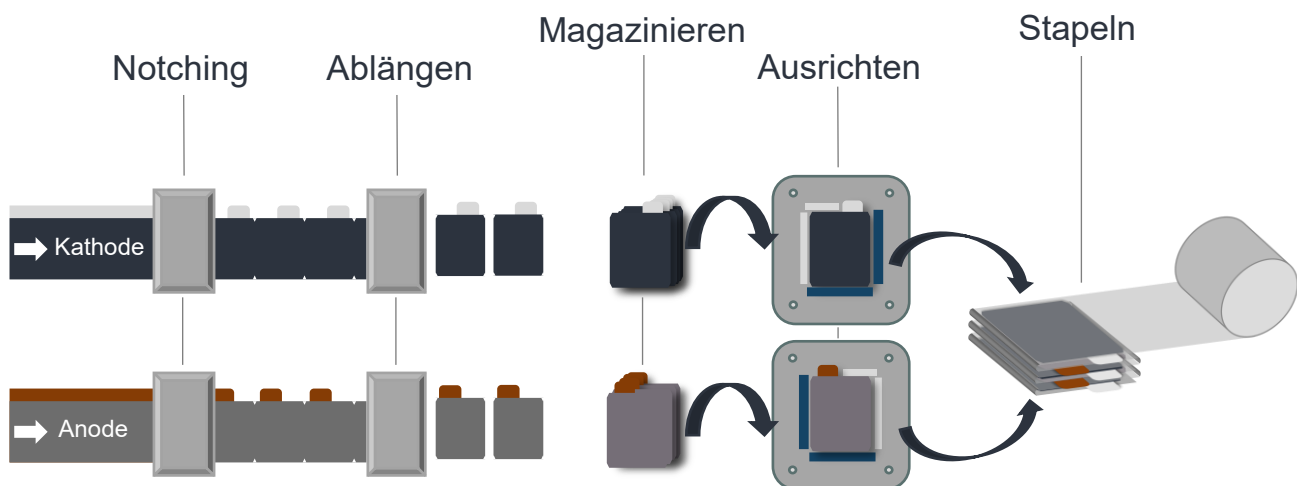


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Vereinzelung und Stapelbildung (in Anlehnung an (Weinmann 2022))

Neben der allgemeingültigen angestrebten Beschädigungs- und Partikelfreiheit wird die Prozessqualität bei der Vereinzelung vordergründig durch die Beschaffenheit der Schnittkanten und die Einhaltung der geometrischen Maßhaltigkeit der vereinzelter Blätter charakterisiert (Jansen et al. 2020; Weinmann et al. 2018). Bei der Stapelbildung wird die Stapelgenauigkeit als Maß der Qualität herangezogen. So wirken sich geometrische Ungenauigkeiten der einzelnen Elektrodenblätter zueinander negativ auf die Zelleigenschaften (Kapazität und Zyklenstabilität) aus (Leithoff et al. 2020).

In der industriellen Praxis wird zwischen verschiedenen Genauigkeitsangaben unterschieden. Diese Genauigkeitsangaben finden sich oftmals in den Leistungsanforderungen an Stapelbildungsmaschinen wieder. So wird zunächst danach unterschieden, welche Komponenten in einem Zellstapel bzw. einem ESV miteinander verglichen werden. So können die einzelnen Komponenten (Anodenblätter, Kathodenblätter, Separator) jeweils miteinander (Anode-Anode, Kathode-Kathode, Separator-Separator) oder im Zellverbund untereinander (z. B.: Anode-Kathode) verglichen werden. Weiter wird dahingehend unterschieden, die Positionsabweichungen der Mittelpunkte oder Endflächen miteinander zu vergleichen. Zuletzt wird eine weitere Unterscheidung vorgenommen, direkt angrenzende Komponenten miteinander zu vergleichen oder die maximale Abweichung im gesamten Stapel zu untersuchen. Die am häufigsten anzutreffende Angabe ist der Vergleich der Einzelkomponenten miteinander. (Weinmann 2022)

2.2.2.2 Verwendete Maschinenteknik

Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die für den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess verwendete Maschinenteknik. Hierbei wird zunächst die industriell etablierte Maschinenteknik vorgestellt. Im Anschluss daran wird Bezug zu neuartigen Konzepten genommen.

Vereinzelungsmaschinen

Das Vereinzeln beinhaltet i. d. R. das Notching und das Ablängen der Elektrodenblätter aus dem zugeführten, aufgewickelten Rollenmaterial. Die Maschinenteknik hierfür umfasst neben den Notching- und Ablängssystemen in erster Linie entsprechende Komponenten bahnverarbeitender Systeme. Die Abbildung 2-8 zeigt schematisch den Aufbau einer Vereinzelungsmaschine mittels Stanzwerkzeug.

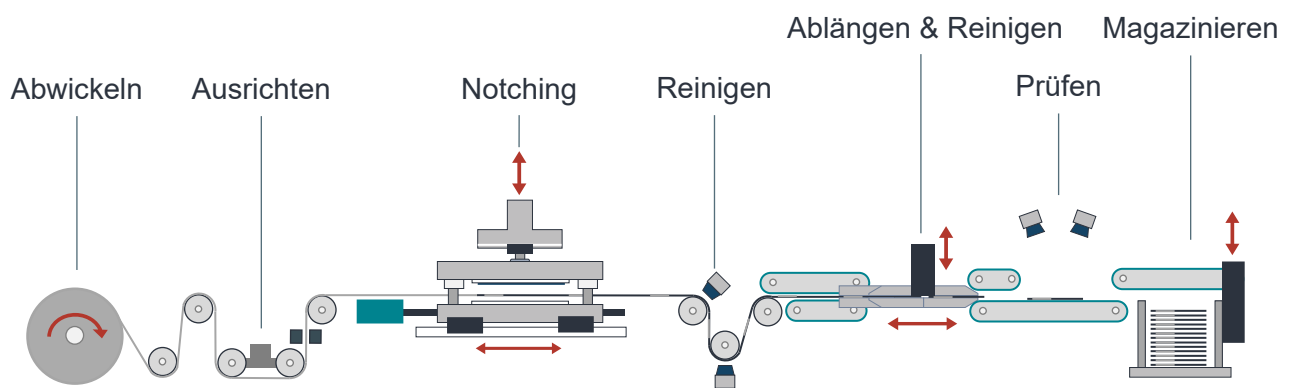


Abbildung 2-8 Schematische Darstellung einer Vereinzelungsmaschine mittels Stanzwerkzeug (in Anlehnung an (Weinmann 2022))

Das Elektrodenmaterial wird in einem ersten Schritt mittels eines Antriebs von dem Coil abgewickelt und anschließend über entsprechende Umlenkrollen zu einer Ausrichteinheit geführt. An dieser Stelle wird der Geradlauf der Bahnkante geregelt. Hierfür können sog. Drehrahmen in Kombination mit Bahnkantensensoren verwendet werden (Neska & Majcher 2014; Seshadri & Pagilla 2010). Neben der Regelung des Bahngeradlaufes wird bei entsprechenden Bahnverarbeitungsprozessen ebenfalls die Bahnzugkraft bzw. der Bahnzug geregelt. In dem gezeigten Fall erfolgt die Regelung über die Ansteuerung des Abwicklers. Es können aber ebenfalls sog. Tänzersysteme zur aktiven Bahnzugregelung verwendet werden (Gassmann et al. 2009). Nach dem Ausrichtprozess erfolgt das Notching mittels einer Stanze und hiernach wird die Bahn gereinigt. Die Elektrodenblätter werden dann mittels Ober- und Untermesser über einen Scherschnitt aus der Bahn abgelängt. Die Blätter werden darauf erneut gereinigt. Anschließend erfolgt

eine optische Qualitätssicherung, bei der die Schnittkanten, die Blattoberfläche und geometrische Beschaffenheit der abgelängten Elektrodenblätter überprüft werden. Abschließend erfolgt das Magazinieren der Blätter. Alternativ zum Stanzen beim Notching-prozess und zum Ablängen mittels Scherschnitt werden auch Lasersysteme eingesetzt.

Stapelbildungsmaschinen

Nach der Vereinzelung erfolgt der Aufbau des Elektrode-Separator-Verbunds. Im Folgenden wird beispielhaft die Maschinenteknik anhand einer Z-Falt-Stapelmaschine dargestellt. Diese Art von Stapelmaschine ist zum aktuellen Zeitpunkt als konventionell eingesetzte Technologie einzustufen. Die Bezeichnung dieses Prozesses bzw. dieser Maschinen erfolgt in Anlehnung an den strukturellen Aufbau des z-förmig gefalteten Verbunds der Batteriezelle. Entsprechende Maschinen sind hier bereits im industriellen Kontext im Einsatz und gelten als Stand der Technik (Aydemir et al. 2021). In der Abbildung 2-9 wird schematisch der Aufbau einer Stapelmaschine mit statischer Stapelstation dargestellt.

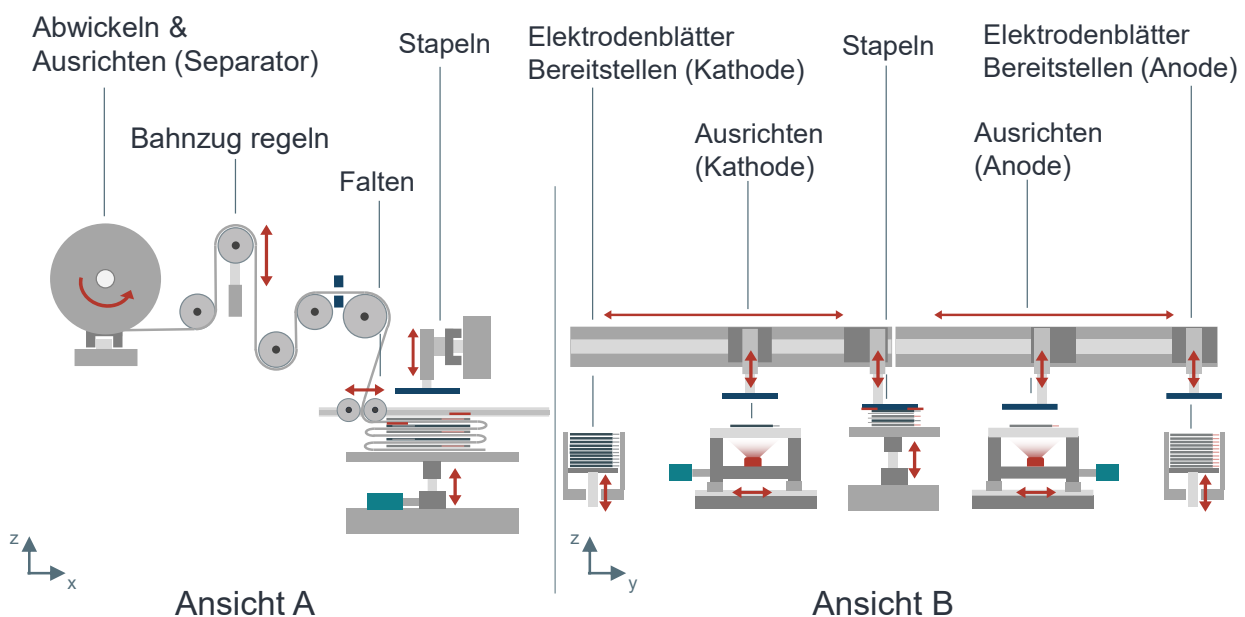


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung einer Stapelmaschine mit statischer Stapelstation

Der Aufbau wird in zwei Ansichten dargestellt. In der Ansicht A ist der Materialfluss des Separators zu sehen. Der Separator wird als Bahn verarbeitet und als Coil der Produktionsmaschine bereitgestellt. Der Separator wird zunächst von dem Coil abgewickelt. In diesem Beispiel erfolgt die Regelung des Geradlaufs der Materialbahn über das Verstellen der Coil-Position in der y -Richtung. Anschließend wird der Separator über ein

entsprechendes Rollensystem weitergeführt. Die Bahnzugkraft wird hier über ein Tänzersystem geregelt. Das System besteht aus einer in z-Richtung verstellbaren Umlenkrolle. Das Verstellen erfolgt hierbei über entsprechende Druckluftzylinder, angesteuert über ein Proportionalregelventil. Abhängig von dem eingestellten Druck im Zylinder wird eine Kraft auf die Separatorbahn aufgebracht. Der Bahnzug selbst wird über eine Messwalze aufgenommen. Der Separator wird anschließend zu der Stapelstation geführt. Hier befindet sich der Stapeltisch, auf welchem alternierend die einzelnen Elektrodenblätter abgelegt werden. Der Separator wird nach jedem abgelegten Elektrodenblatt über ein bewegtes Rollenpaar über das Blatt gefaltet. Hierdurch ergibt sich ein Z-förmiger und für den Prozess namensgebender Strukturaufbau des Separators. Unterschieden wird an dieser Stelle zwischen einer statischen und bewegten Stapelstation. Bei der bewegten Stapelstation wird der Stapeltisch in x-Richtung verfahren, um die Z-Faltung zu erzeugen. Bei der statischen Stapelstation wird die obere Separatorzuführung in x-Richtung verfahren (vgl. Abbildung 2-9). Der Stapeltisch selbst wird nach jeder abgelegten Lage über einen Antrieb abgesenkt. Die Fixierung des Zellstapels erfolgt durch Klemmfinger. Die Ansicht B veranschaulicht den Materialfluss und die Handhabung der Elektrodenblätter. Diese werden der Maschine, ausgehend von dem Vereinzelungsprozess, vorkonfektioniert in Magazinen bereitgestellt. Die Handhabung der Elektroden erfolgt jeweils durch zwei Greifer, welche auf einer gemeinsamen Achse montiert sind. Zum Greifen der Elektrodenblätter haben sich insbesondere flächige Unterdruckgreifer und Vakuumpunktgriener etabliert (Fröhlich et al. 2018). Folgende Erläuterungen beziehen sich jeweils auf die Verarbeitung einer Elektrode. Die Funktionsweise ist jedoch für die Kathoden- und Anodenblätter analog. Zunächst wird durch den äußeren Greifer ein Elektrodenblatt aus dem Elektrodenmagazin entnommen. Dieses Blatt wird dann auf einen Ausrichttisch abgelegt. Hierbei wird, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, entweder über mechanische Anschläge oder über ein Kamerasystem das entnommene Blatt in der Position ausgerichtet. Bei der Nutzung eines Kamerasystems besteht die Möglichkeit, den Ausrichttisch selbst über entsprechende Antriebstechnik zu verfahren. Alternativ kann die Position des Greifers nach der Entnahme korrigiert werden. Nach dem Ausrichten entnimmt der zweite Greifer auf der Achse das Elektrodenblatt von der Ausrichtstation. Zeitgleich wird durch den ersten Greifer erneut ein Elektrodenblatt aus dem Magazin entnommen. Abschließend wird das Elektrodenblatt auf dem Stapeltisch abgelegt und der Separator darübergefaltet. Dieser Vorgang erfolgt mehrfach und al-

ternierend. Sobald der Stapel aufgebaut wurde, erfolgen die Entnahme, ggf. ein weiteres Umwickeln des Stapels mit Separatormaterial und ein *taping*. Beim *taping* wird der Stapel durch Klebestreifen fixiert. Hierdurch werden die Elektrodenblätter in dem Stapel gegen ein Verrutschen gesichert. (Bach 2017; Weinmann 2022)

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Prozesse der Vereinzelung und Stapelbildung primär durch mechanische, maschinenspezifische Eigenschaften wie Antriebssysteme, Handhabungstechnik und kinematische Abläufe geprägt sind.

Neue Maschinenkonzepte zur Produktivitätssteigerung und Flexibilisierung

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass die maschinelle Ausgestaltung des Stapelbildungsprozesses, respektive Stapelbildungsprozesses mit integriertem Vereinzelungsprozess, von einer hohen Diversität gekennzeichnet ist. Mit dem Ziel der Produktivitätssteigerung und Flexibilisierung sind verschiedene Entwicklungstätigkeiten beobachtbar. Abbildung 2-10 veranschaulicht vor diesem Hintergrund die Anzahl an Anmeldungen neuer Maschinenkonzepte am *European Patent Office*. Zusätzlich sind die entsprechend verwendeten Suchbegriffe und angewandte Filter zu den internationalen Patentklassifikationen (IPC) dargestellt. Es lässt sich hierbei erkennen, dass die Anzahl der Anmeldungen in den letzten Jahren im Allgemeinen stark zugenommen hat.

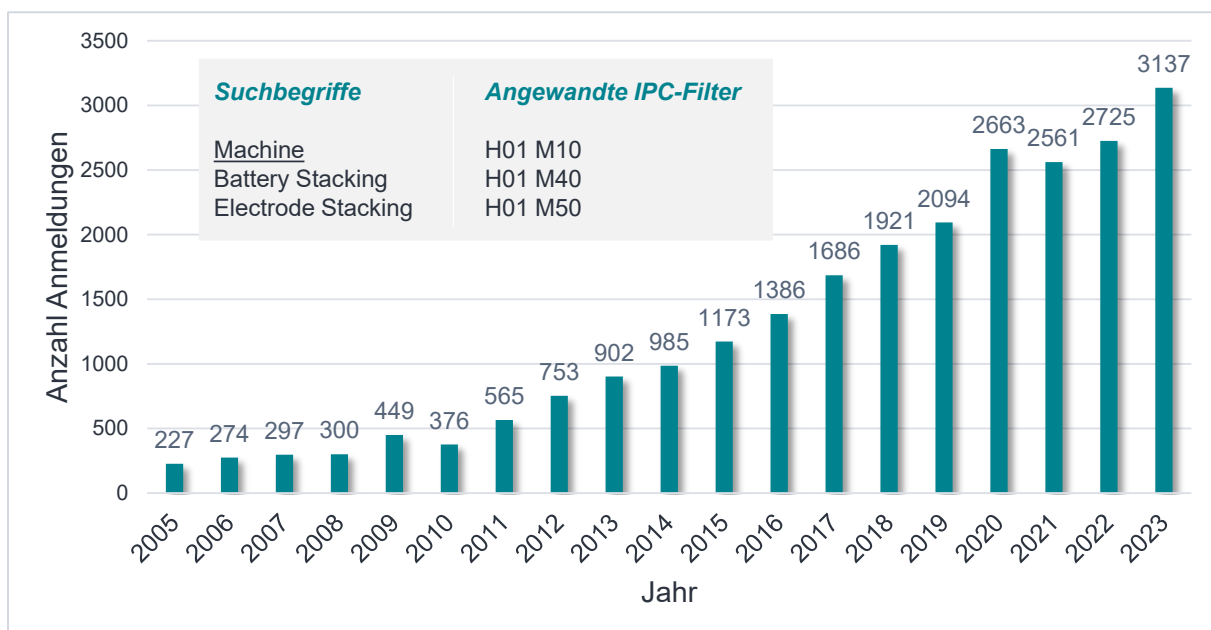
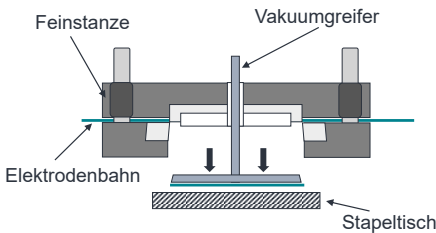
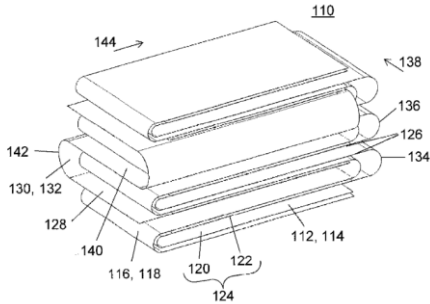
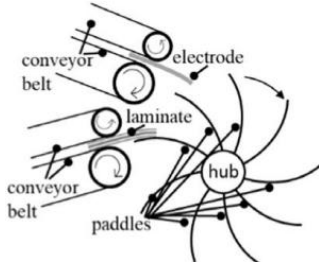


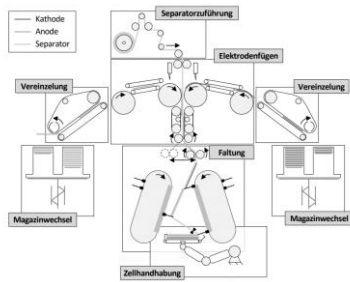
Abbildung 2-10: Anzahl patentierter Maschinenkonzepte für die Stapelbildung

Dieser Trend ist dadurch zu begründen, dass seitens Forschung und Industrie entsprechende Maßnahmen getroffen werden, um durch neuartige Maschinenkonzepte die

Produktivität und Flexibilität von Stapelbildungskonzepten zu erhöhen. Durch die steigende Anzahl an Patentanmeldungen soll gezeigt werden, dass neben der Vielzahl entsprechender Verbundbauweisen eine ebenso hohe Variantenvielfalt an Maschinenkonzepten existiert. Diese belaufen sich oftmals auf konzeptionelle Ausarbeitungen und sind nicht im industriellen Umfeld oder gar praktisch erprobt. Im Folgenden werden neue Maschinenkonzepte dargestellt, welche im Rahmen öffentlicher Forschungsarbeiten entwickelt worden sind. Die Tabelle 2-1 veranschaulicht beispielhaft eine Auswahl neuer Maschinenkonzepte für die Vereinzelung und Stapelbildung von Batteriezellen.

Tabelle 2-1: Auszug neuer Maschinenkonzepte in der Forschungslandschaft

Konzeptbezeichnung	Fokussierte Optimierung
Funktionsintegrierte Einzelblattstapelbildung  (Baumeister 2017)	<i>Optimierung der Stapelgenauigkeit durch eine funktionsintegrierte Vereinzelungseinheit.</i>
Helix Verfahren  (Baumeister et al. 2015)	<i>Kontinuierlicher Stapelbildungsaufbau mit Elektroden und Separatorbahnen. Vereinzelungsprozess der Elektroden nicht notwendig.</i>
Stapelrad mit Hochdurchsatz-Materialzuführung  (Boeselager et al. 2023)	<i>Produktivitätssteigerung durch das Handhaben und Stapeln (laminierten) Elektrodenblätter mittels rotierenden Rades.</i>

KontiBAT-Anlage

Produktivitätssteigerung durch eine kontinuierliche Prozessführung in der Stapelbildung.

(Aydemir 2021; Dittmann et al. 2022)

EXINOS – flexible und kontinuierliche Stapelbildung

Produktivitätssteigerung durch eine kontinuierliche Prozessführung und Formatflexibilität mittels funktionsintegrierten Handhabungssystems.

(Weinmann 2022)

Bei der *funktionsintegrierten Einzelblattstapelbildung* werden die Elektroden in einer Anlage vereinzelt und gestapelt. Die Elektrodenblätter werden durch einen Scherschnitt mittels Feinstanzen hergestellt. Innerhalb der Feinstanze befindet sich ein Vakuumgreifer, der das vereinzelte Elektrodenblatt festhält und anschließend auf einem traversierenden Stapeltisch ablegt. Die Separatorbahn wird mittels keramischer Klinge vereinzelt. Dadurch, dass die Elektrodenblätter direkt während des Stanzprozesses gehalten und abgelegt werden, geht ihre Position nicht verloren. Der Fokus dieses Konzeptes liegt somit auf Präzision und einer optimierten Stapelgenauigkeit. (Baumeister 2017)

Bei dem *Helix-Verfahren* handelt es sich um die Herstellung eines helixförmigen Verbundaufbaus, bei dem die Elektrodenbahnen in einer „zickzackartigen“ Faltung übereinandergelegt werden. Dabei werden abwechselnd alternierend-beschichtete Elektrodenbahnen zusammen mit dem Separator kontinuierlich zu einem Zellstapel gefaltet. Im Mittelpunkt dieses Verfahrens steht die kontinuierliche Prozessführung. Ein separates Vereinzeln der Elektroden ist dabei nicht notwendig. (Baumeister et al. 2015; Haag 2020)

Das *Stapelrad mit Hochdurchsatz-Materialzuführung* fokussiert insbesondere den Aspekt der Produktivitätssteigerung. Hierbei werden einzelne Elektrodenblätter oder laminierte Teilverbünde über entsprechende Förderbänder in ein rotierendes Rad mit integrierten Schaufelstrukturen geführt. Lamierte Teilverbünde sind Elektrodenblätter, die durch Wärmeeinwirkung mit dem Separator verbunden werden (Leithoff et al. 2022). Über die Rotationsbewegung des Rades werden die Elektrodenblätter oder Lamine gehandhabt, transportiert, ausgerichtet und in einem Magazin alternierend abgelegt und gestapelt. (Boeselager et al. 2022)

Die *KontiBAT-Anlage* zeichnet sich insbesondere durch eine kontinuierliche Prozessführung aus. Hierdurch wird ebenfalls eine Produktivitätssteigerung angestrebt. Aus einem Magazin werden die Elektrodenblätter über Förderbänder an den bandförmigen Separator geklebt und anschließend einem Handhabungssystem zugeführt. Über eine linear umlaufende und kontinuierliche Bewegung von Greifern wird eine Faltung in dem ESV erzeugt und somit der Stapel gebildet. (Aydemir 2021)

Bei dem *EXINOS-Maschinenkonzept* steht neben der Produktivitätssteigerung durch eine kontinuierliche Prozessführung ebenfalls die Flexibilisierung hinsichtlich herzustellender Batterieformate im Fokus. In dem Maschinenkonzept wird das Elektrodenmaterial zunächst bandförmig einem rotierenden Handhabungssystem zugeführt. Über verstellbare Greifer, in die ebenfalls eine Schneidvorrichtung integriert ist, werden Elektrodenblätter aus der Materialbahn abgelängt und ebenfalls auf einem Separator aufgeklebt. Über einen Faltungsprozess wird abschließend der Stapel aufgebaut. Eine detaillierte Vorstellung des Konzeptes erfolgt als Teil dieses Vorhabens in Kapitel 4.2.1. (Weinmann 2022)

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass ein Großteil der aktuellen Maschinenkonzepte zur Steigerung der Produktivität darauf abzielen, im Vergleich zum bisherigen Stand der Technik diskrete *Pick-and-Place*-Operationen zu vermeiden. Dies dient dem Zweck, die typischen Stillstandzeiten bzw. Beschleunigungs- und Abbremsphasen zu minimieren, die mit solchen Prozessen verbunden sind.

2.3 Modellierungstätigkeiten im Kontext der Batterieproduktion

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Modellierungstätigkeiten im Kontext der Batteriezellfertigung gegeben. Zunächst werden die allgemeinen Bestrebungen der modellbasierten Wirkzusammenhangsquantifizierung dargelegt und insbesondere die Modellierungsaktivitäten für die Vereinzelung und Stapelbildung aufgezeigt. Auf dieser

Basis werden dann das Forschungsdefizit und der notwendige Handlungsbedarf abgeleitet.

2.3.1 Modellklassifizierung und Ansätze für die Batterieproduktion

Für die Batterieproduktion werden seitens Industrie und Forschung intensive Anstrengungen unternommen, die Prozesse mithilfe von digitalen Modellen abzubilden. Hierdurch bietet sich die Möglichkeit, die noch nicht in Gänze verstandenen Zusammenhänge der Batterieproduktionskette risikolos zu analysieren und Optimierungsansätze abzuleiten. (Thomitzek et al. 2022)



Abbildung 2-11: Mögliche Klassifizierung digitaler Modelle / digitaler Zwillinge (eigene Abbildung in Anlehnung an (Henschel et al. 2023; Overbeck 2023))

Die beobachtbaren Modellierungstätigkeiten erstrecken sich auf die unterschiedlichen Prozesse der Batterieproduktion, für unterschiedliche Produktionsphasen und in verschiedenen Skalen/Ebenen. Die Tätigkeiten lassen sich meist unter dem Trendbegriff des *digitalen Zwillinges* einordnen. So führen (Henschel et al. 2023) und (Overbeck 2023) Klassifizierungen von digitalen Zwillingen respektive digitalen Modellen ein, welche im Folgenden aufgegriffen und unter dem Gesichtspunkt der Batterieproduktion betrachtet werden. Die Abbildung 2-11 veranschaulicht eine mögliche Klassifizierung digitaler Modelle / digitaler Zwillinge mit entsprechenden Anwendungsbeispielen. So wird zwischen unterschiedlichen Fokusebenen unterschieden. Die nahe Fokusebene

umfasst die Modellierung des Materialverhaltens auf mikroskopischer Ebene. Bei der Modellierung auf Prozessebene wird das Materialverhalten unter verschiedenen, festgelegten Prozessparametern auf makroskopischer Ebene modelliert. So wird hier die Faltenbildung von Elektrodenbahnen in der Handhabung dargestellt. Die Modellierung auf der Maschinenebene innerhalb einer Produktionsanlage wird eine Fokusebene über der Prozessebene angeordnet. Hierbei werden unterschiedliche Aspekte und Charakteristika der Produktionsmaschine betrachtet. Dies umfasst beispielsweise die Steifigkeiten und regelungs-/steuerungsseitigen Aspekte. Die Modellierung auf der Fabrikebene liegt über der Maschinenebene. Hierbei werden ganze Produktionssysteme mit Materialflüssen, Taktzeiten und Durchlaufzeiten abgebildet. Die höchste Fokusebene wird hier als globale Ebene definiert. Die Modellierung von Lieferengpässen und Verfügbarkeiten steht dabei im Fokus. (Henschel et al. 2023)

Diese Betrachtung wird von (Schönemann et al. 2019) weiter aufgenommen und unter dem Begriff der Multi-Skalen-Simulation betrachtet. Hier wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, der sich auf den Einsatz von gekoppelten Simulationsmodellen stützt, um über verschiedene Ebenen hinweg ganzheitliche Optimierungsstrategien für die Batterieproduktion zu entwickeln.

Im Kontext der Batterieproduktion sind Modellentwicklungsaktivitäten für die dargestellten Fokusebenen zu verzeichnen. Die *Abbildung 2-12* veranschaulicht auszugsweise aktuelle Tätigkeiten im Bereich der Modellentwicklung für die unterschiedlichen Ebenen ausgewählter, relevanter Prozessschritte der Batterieproduktion. Die Arbeiten im Zusammenhang der Fabrik- und Globalebene werden keinen konkreten Prozessschritten zugeordnet, da in der Regel die gesamte Prozesskette in die Betrachtungen eingeschlossen wird. Der entsprechende Fokus der Arbeiten wird anhand des Farbverlaufes dargestellt. Hierbei deutet der grün hinterlegte Bereich den entsprechenden Fokus an. Der grau hinterlegte Bereich zeigt auf, welche vereinzelt Einflüsse benachbarter Fokusebenen hinzugezogen werden. Insbesondere ist hervorzuheben, dass ein Großteil der Simulationsaktivitäten aus den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekten, wie beispielsweise Sim2Pro (BMBF 03XP0075) und Sim4Pro (BMBF 03XP0242), des Forschungsclusters ProZell stammt.

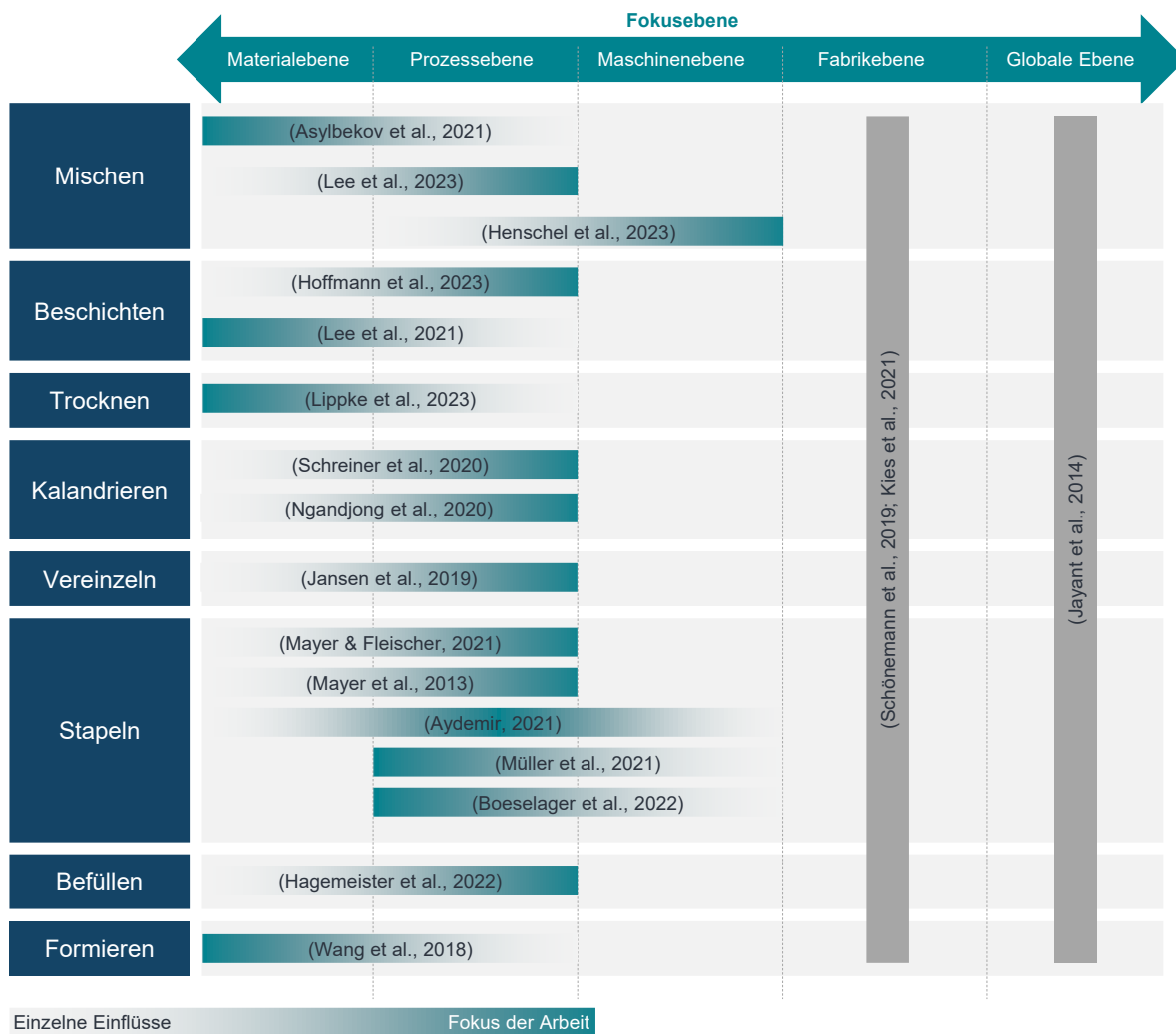


Abbildung 2-12: Modellentwicklungstätigkeiten im Kontext der Batterieproduktion

Für den Mischprozess stellen (Asylbekov et al. 2021) einen Modellierungsansatz vor, der mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode die Scherspannungen von Carbon-Black-Partikeln simuliert. (Min Lee et al. 2023) betrachten das kontinuierliche Mischen mit einem Doppelschneckenextruder und fokussieren sich dabei auf entsprechende Scherkräfte. (Henschel et al. 2023) präsentieren einen Ansatz, der sich auf die Modellierung des maschinenseitigen Verhaltens konzentriert und die Auswirkungen der steuerungsseitigen Programmierung auf das kinematische Verhalten einer Doppelschneckenextrudermaschine untersucht. Die resultierenden Verhaltensweisen der Maschine werden anschließend in einer CAD-Software visualisiert.

Für den Beschichtungsprozess stellen (Hoffmann et al. 2023) einen Ansatz zur CFD-Simulation der Beschichtung mittels Schlitzdüse vor, wobei das Prozessverhalten auf Basis der Materialeigenschaften fokussiert wird. (Lee et al. 2022) modellieren das Fließverhalten von Anodenslurries. Für die Modellierung des Trocknungsprozesses sind die

Arbeiten von (Lippke et al. 2023) zu nennen, in denen das strukturelle Materialverhalten von Elektrodenmaterialien während des Trocknungsprozesses mittels diskreter Elemente modelliert wird.

Die Modellierung des Kalandrierprozesses kann beispielhaft anhand der Studien von (Schreiner et al. 2020) und (Ngandjong et al. 2021) illustriert werden. Diese Arbeiten zeigen unter Verwendung diskreter Elemente, wie sich der Verdichtungsprozess auf das Verhalten des Materials auswirkt.

Die Studie von (Jansen et al. 2019) fokussiert sich auf die Modellierung der Beziehungen zwischen den Prozessparametern bei der Vereinzelung von Elektrodenblättern mittels Laser und deren Einfluss auf die Qualität der Schnittkanten. Diese Zusammenhänge werden durch experimentelle Untersuchungen erfasst.

Bei der Stapelbildung zeichnen sich verschiedene Modellierungsaktivitäten ab. Die Arbeiten von (Mayer et al. 2023b; Mayer & Fleischer 2021) beschäftigen sich mit der Modellierung der materialseitigen Einflüsse kalandrierter und vereinzelter Elektrodenblätter auf den Stapelbildungsprozess. Hierbei wird mittels FE-Simulation das Ablageverhalten und hierdurch die Stapelgenauigkeit ermittelt. Der Fokus liegt auf der Quantifizierung der Einflüsse des Kalandriergrades auf Ungenauigkeiten im Zellstapel. In den Arbeiten von (Aydemir 2021) erfolgt eine umfassende Modellierung verschiedener Teilprozesse innerhalb der beschriebenen KontiBat-Fertigungsanlage. Dabei konzentrieren sich die Untersuchungen auf die Identifizierung von Prozessgrenzen, die von den Materialeigenschaften und spezifischen Maschinendetails abhängen. Es werden dabei diverse Modellierungsstrategien angewandt, um ein tiefgehendes Verständnis der Zusammenhänge zu erlangen. Die Forschungsarbeiten von (Boeselager et al. 2022; Müller et al. 2021) beinhalten ebenfalls umfangreiche Simulationsstudien, die darauf abzielen, Teilprozesse innerhalb neuer Technologien zur Stapelbildung zu quantifizieren. Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen steht der Prozess selbst, insbesondere die Erfassung von Materialbelastungszuständen unter Berücksichtigung verschiedener Prozessparameter, wobei FE-Simulationen zum Einsatz kommen.

Beim Befüllen sind z. B. die Arbeiten von (Hagemeister et al. 2022) zu nennen. Hierbei wird der Befüllprozess ebenfalls mittels CFD-Simulationen abgebildet. Auf dieser Basis können Aussagen zum Benetzungsverhalten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Zelldesigns getroffen werden.

(Wang et al. 2018) beschäftigen sich mit der Modellierung der SEI-Bildung während des Formierungsprozesses. Der Blickpunkt liegt in der Materialebene. Hinsichtlich der Fabrikebene, in der im Wesentlichen alle Prozessschritte betrachtet werden, sind die Arbeiten von (Schönemann et al. 2019) und (Kies et al. 2021) zu nennen. (Schönemann et al. 2019) betrachten, wie o. g. Ansätze zur Konnektivität zwischen verschiedenen Skalensimulationen für die unterschiedlichen Prozessschritte in der Batterieproduktion, um somit entsprechende Optimierungsansätze auf Fabrikebene ableiten zu können. (Kies et al. 2021) zeigen auf, wie im Bereich des digitalen Zwillings entsprechende Modelle hinsichtlich der Abbildung einer gesamten Fabrik in eine digitale Infrastruktur eingebettet werden können. Die Arbeiten von (Jayant et al. 2014) werden der globalen Ebene zugeordnet. Hierbei wird die Entwicklung eines Simulationsmodells für Reverse-Logistik-Netzwerke zur Ressourcenrückgewinnung von EOL-Batterien beschrieben. Der konkrete Bezug zu den Produktionsprozessen ist nur indirekt gegeben. Die Modellierung auf Fabrik- und Globalebene wird in den weiteren Betrachtungen ausgeklammert.

Insgesamt ist zu erkennen, dass sich ein Großteil der Arbeiten mit der Modellierung auf der Material- und Prozessebene beschäftigt. Der Schwerpunkt liegt hierbei oftmals auf den materialseitigen Einflüssen auf die jeweiligen Produktionsprozesse. Die Modellierungstätigkeiten auf der Maschinenebene sind zum aktuellen Zeitpunkt nicht sonderlich ausgeprägt. Da insbesondere die Prozesse der Vereinzelung und Stapelbildung maßgeblich durch maschinenspezifische Eigenschaften wie Kinematik, Antriebssysteme und Mechanik beeinflusst werden, ist eine detaillierte Modellierung maschinenseitiger Einflüsse zwingend erforderlich. Darüber hinaus ist erkennbar, dass für diese Prozesse keine standardisierten Produktionsmaschinen existieren, sondern vielmehr verschiedene Maschinentypen und -konzepte. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, eine generalisierte Methode zum Aufbau von Maschinenmodellen für die Vereinzelung und Stapelbildung bereitzustellen. Auf dieser Basis können ebenfalls entsprechende ganzheitliche virtuelle Produktionssysteme genutzt werden (Husseini et al. 2023; Yesilyurt et al. 2022).

2.3.2 Modellierung von Produktionsmaschinen

Im Folgenden werden die Potenziale der Maschinenmodellierung und Ansätze zur Modellierung dargestellt. Die Anwendungsfälle und Ansätze werden in den eigenen Ausarbeitungen zur Modellierung des Maschinenverhaltens von Vereinzelungs- und Stapelbildungsanlagen aufgegriffen.

2.3.2.1 Potenziale digitaler Maschinenmodelle

Abbildung 2-13 veranschaulicht zunächst qualitativ die Potenziale der Nutzung digitaler Maschinenmodelle für die Entwicklung, Inbetriebnahme und Einrichtung. So besteht im Allgemeinen die Möglichkeit, durch Maschinenmodelle sowohl den Entwicklungsaufwand neuer Maschinen wie auch deren Inbetriebnahme und Einrichtung zu verkürzen und effizienter zu gestalten. So lassen sich Wirkzusammenhänge simulativ untersuchen und beispielsweise der Einfluss des Maschinendesigns und der Komponenten auf Aspekte wie Genauigkeit und Geschwindigkeit analysieren. Schwachstellen können dadurch frühzeitig identifiziert und behoben werden, sodass diese nicht erst während der realen Inbetriebnahme oder im Betrieb festgestellt werden müssen. Ein früherer Betriebszeitpunkt mit optimierten Maschinenparametern kann dadurch erreicht werden. (Lechler et al. 2019)

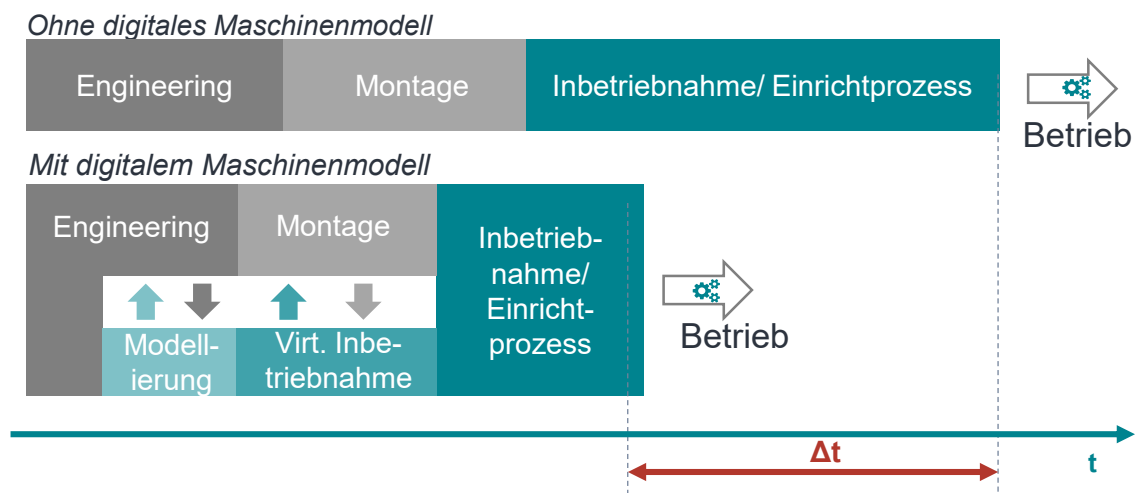


Abbildung 2-13: Potenziale digitaler Maschinenmodelle für die Entwicklung und Inbetriebnahme/Einrichtung (in Anlehnung an (Lechler et al. 2019))

Ansätze zur Erschließung von Optimierungsmöglichkeiten mittels digitaler Maschinenmodelle im Betriebszustand können bspw. über echtzeitnahe, im Betrieb mitlaufende Modelle und die Einbindung virtueller Sensoren realisiert werden. So besteht z. B. die

Möglichkeit, das Maschinenverhalten auf Basis modellierter, nicht messbarer Daten einzuregeln. (Martin et al. 2021)

2.3.2.2 Ansätze zur Maschinenmodellierung

Für die Modellierung von Produktionsmaschinen werden generell unterschiedliche Verfahren angewandt. Diese werden je nach Anwendungsbereich und Komplexität der Maschine eingesetzt. Zu erkennen ist, dass Modellierungstätigkeiten z.B. im Bereich der Werkzeugmaschinen sehr ausgeprägt sind und intensiv mit diversen Methoden verfolgt werden. Die Tabelle 2-2 veranschaulicht gängige Modellierungsverfahren und entsprechende beispielhafte Arbeiten dazu.

Ein Ziel der *Ablaufsimulation* besteht darin, das Verhalten einer Maschine basierend auf dem entwickelten Steuerungsprogramm in einer virtuellen CAD-Umgebung zu visualisieren. Durch diese Simulation können verschiedene Aspekte wie das Ablauf- bzw. Steuerungsprogramm virtuell getestet und die Bewegungen der Maschine auf mögliche Kollisionen überprüft werden (Özdemir & Brecher 2013).

Tabelle 2-2: Gängige Modellierungsverfahren für Produktionsmaschinen

Modellierungsverfahren	Beispiele	Arbeiten
Ablaufsimulation	Validierung Steuerungscode und Kollisionsüberprüfung	(Özdemir & Brecher 2013)
Diskrete Modellierungsverfahren	Modellierung Verformungseffekte und Validierung Steifigkeiten	(Galant et al. 2016)
Systemsimulation	Analyse komplexer Wechselwirkungen auf Basis multiphysikalischer Modelle	(Chen et al. 2015)
Datenbasierte Verfahren	Nutzung von Mess- oder virtuellen Datensätzen zur Entwicklung von KI-Modellen	(Chang et al. 2018)

Diskrete Modellierungsverfahren, wie beispielsweise die Finite-Elemente-Methode, ermöglichen die Simulation von Verformungseffekten und Steifigkeiten komplexer Strukturen. Diese Verfahren spielen eine wichtige Rolle bei der Auslegung von Maschinen, da sie eine präzise Analyse von Genauigkeiten ermöglichen (Galant et al. 2016). Die Anwendung multiphysikalischer *Systemsimulationen* für Maschinen ermöglicht eine umfassende Analyse und Optimierung von Maschinensystemen durch die Berücksichtigung und Kopplung verschiedener physikalischer Phänomene wie Reibungseffekte, Wärmeübertragung und der Regelungsstruktur (Chen et al. 2015). Über *datenbasierte Verfahren* können entsprechende KI-Modelle mittels sensortechnisch erfasster bzw. simulativ generierter Datensätze aufgebaut werden. Ein Anwendungsgebiet dieser Modelle kann der Einsatz während des Maschinenbetriebs sein (Chang et al. 2018).

Die dargestellten Modelle können einzeln oder in Kombination verwendet werden, um das Verhalten von Produktionsmaschinen zu analysieren, die Effizienz zu optimieren, Fehlerursachen zu identifizieren oder neue Steuerungs- und Regelungsstrategien zu entwickeln. Die Wahl des Modells hängt von der spezifischen Fragestellung, der Komplexität der Maschine und den verfügbaren Daten ab.

2.4 Zusammenfassung und Ableitung des Forschungsdefizits

Folgend wird eine kurze Zusammenfassung des Standes der Technik und Forschung gegeben. Basierend hierauf erfolgen die Ableitung des Forschungsdefizits und die Erläuterung des Handlungsbedarfes.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die marktseitigen Anforderungen hinsichtlich benötigter Batteriezellen zukünftig eine signifikante Erhöhung der Produktionskapazitäten erfordern. Zusätzlich sind weitere Trends bezüglich neuer Materialien und Zelldesigns beobachtbar. So werden bspw. stetig Anstrengungen unternommen, die volumetrischen Energiedichten von Batteriezellen zu erhöhen. Diese Bestrebungen resultieren in der Reduktion von Folienstärken bei Elektroden und Separatoren. Die beschriebenen marktseitigen Anforderungen und beobachtbaren Trends stellen eine wesentliche Herausforderung für Maschinen- und Anlagenbauer und Zellhersteller dar. Maschinen- und Anlagenbauer sehen sich damit konfrontiert, effizientes Equipment in kurzer Zeit und in der entsprechenden Anzahl bereitzustellen. Zellhersteller müssen angesichts der volatilen Marktsituationen in der Lage sein, das Equipment effizient zu betreiben. Der Materialausschuss stellt ein prominentes Problem dar, insbesondere während des Ramp-up-Prozesses von Maschinen. Dieses Problem lässt sich auf die

unzureichende Kenntnis der Wirkzusammenhänge zwischen Material, Maschine und Prozess zurückführen. Maschinen werden in der Entwicklungsphase fehlerhaft dimensioniert oder nicht optimal auf die spezifischen Anforderungen der Produktionsaufgaben eingestellt. Dieser Umstand betrifft insbesondere die Prozessschritte der Vereinzelung und Stapelbildung, respektive Stapelbildung mit integrierter Vereinzelung. In diesem Bereich liegen beträchtliche Optimierungspotenziale. Weiterhin existiert eine Vielzahl neuartiger Maschinenkonzepte, mit dem Ziel der Produktivitätssteigerung oder Flexibilisierung der Maschinentechnik. Hierbei handelt es sich jedoch oftmals um konzeptionelle Ausarbeitungen, welche bisher unerprobt sind. Um diesem Problem zu begegnen, widmen sich die Forschungsgemeinschaft und die Industrie dem Ansatz, die Wirkzusammenhänge mittels Modellierung darzustellen. Der gegenwärtige Schwerpunkt liegt dabei auf der Modellierung der materialeitigen Einflüsse auf den Prozess, wohingegen die maschinenseitigen Einflüsse zum aktuellen Zeitpunkt weniger fokussiert werden.

Die detaillierte Modellierung der maschinenseitigen Einflüsse bei den Prozessen der Vereinzelung und Stapelbildung erweist sich vor dem Hintergrund der signifikanten Ausschussraten und der mangelnden Erprobung neuer Maschinenkonzepte als vielversprechendes Optimierungsfeld. Das wissenschaftliche Forschungsdefizit besteht darin, dass bisher geeignete Maschinenmodelle zur Quantifizierung der Einflüsse des Maschinenverhaltens auf den Prozess unzureichend entwickelt wurden. Für die zentralen Assemblierungsschritte der Vereinzelung und Stapelbildung sind solche Modelle jedoch unerlässlich, da die Maschine einen signifikanten Einfluss auf Prozesseigenschaften wie Qualität und Durchsatz sowie auf den Inbetriebnahmeaufwand ausübt. Die Heterogenität der Maschinentypen und -konzepte in diesen Prozessschritten unterstreicht die Notwendigkeit von Maschinenmodellen zusätzlich. Dieser Umstand wird in der vorliegenden Arbeit zentral adressiert, um dieses Defizit zu schließen und einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Maschinenentwicklung und Prozessqualität sowie zur Reduzierung des Ausschussrisikos zu leisten.

3 Zielstellung und Vorgehensweise

3.1 Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung geeigneter Maschinenmodelle für die Vereinzelung und Stapelbildung zur Modellierung der maschinenseitigen Einflüsse auf die Produktionsprozesse eines Batteriezellstapels. Da diese Prozesse insbesondere durch maschinenspezifische Eigenschaften gekennzeichnet sind und eine Vielzahl unterschiedlicher Maschinenkonzepte und -typen existiert, ist es zwingend notwendig, diese Forschungslücke zu adressieren. Hierdurch soll ein Beitrag zu den gesamtheitlichen Modellierungstätigkeiten in der Batterieproduktion geleistet werden und die bisherigen Ausarbeitungen der Material- und Prozessmodellierung sollen damit um maschinenseitige Aspekte ergänzt werden. Sowohl Entwicklungstätigkeiten neuer Maschinen als auch deren Inbetriebnahme bzw. Einrichtung und Betrieb sollen hierdurch optimiert werden. Die hier dargestellte Methodik und Vorgehensweise sollen Maschinenentwickler und Anwender von Vereinzelungs- und Stapelbildungsanlagen bei dem Aufbau eigener Maschinenmodelle unterstützen, als Leitfaden fungieren und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten hinsichtlich der Batterieproduktion aufzeigen.

3.2 Vorgehensweise

Abbildung 3-1 veranschaulicht die Vorgehensweise dieser Arbeit in Bezug zu dem jeweiligen Kapitel. Die grundsätzliche Vorgehensweise zum Modellaufbau orientiert sich an (VDI 3633 2018). Die Richtlinie bietet Leitlinien und Standards für die Modellierung, Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen zur Unterstützung von Planungs- und Entscheidungsprozessen in der Industrie.

In Kapitel 4 dieser Arbeit stehen die Aufgabendefinition und Durchführung einer umfassenden Systemanalyse der betrachteten Prozesse und Maschinen im Vordergrund. Dieser Analyseprozess zielt darauf ab, die Maschinenteknik eingehend zu charakterisieren und dabei diejenigen Fehlerbilder zu identifizieren, die maßgeblich durch die Maschinen beeinflusst werden. Des Weiteren werden Ursachen für diese Fehlerbilder abgeleitet, um ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen zu erlangen. Hierauf aufbauend werden die zu modellierenden Zielgrößen dargestellt. Die Analyse wird anhand von Produktionsmaschinen des *wbk Institut für Produktionstechnik* durchgeführt, welche ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt werden.



Abbildung 3-1: Vorgehensweise

Im Anschluss an die durchgeführte Aufgabendefinition und Systemanalyse in Kapitel 4 werden in Kapitel 5 die Modellierungsaspekte und deren Detaillierungsgrade ermittelt. Im Vordergrund steht hierbei die methodische Vorgehensweise zur Ableitung der zu modellierenden Aspekte und der Definition der Detaillierungsgrade der Modellierung.

In Kapitel 6 erfolgt die Erläuterung der Modellformalisierung, wobei entsprechende Teilmodelle in einer geeigneten Softwareumgebung erstellt und miteinander gekoppelt werden sollen. Das Ergebnis dieses Vorgangs sind Modelle, die zur Quantifizierung der Auswirkungen der maschinenseitigen Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess dienen.

Im Anschluss daran wird in Kapitel 7 die Modellparametrierung präsentiert. Dabei steht die Bestimmung der spezifischen Werte für die definierten Modellparameter im Mittelpunkt. Die vorgestellte Methodik basiert auf Recherche, Berechnung und Experimenten.

In Kapitel 8 erfolgt die Validierung der Modellgüte. Zu diesem Zweck werden gezielte Versuchsreihen durchgeführt, um Datensätze aufzunehmen. Dabei werden die modellierten Datensätze mit den experimentell erhobenen Daten verglichen. Hierdurch soll eine Einschätzung zu der Modellgüte gegeben werden.

Im Rahmen von Kapitel 9 werden entsprechende Anwendungsszenarien vorgestellt. Hierbei werden Simulationsstudien mit den validierten Modellen durchgeführt und Optimierungsansätze abgeleitet. Die entsprechenden Tätigkeiten beziehen die definierten Anwendungsfälle der Aufgabendefinition mit ein. Weiterhin wird eine Erweiterung der Modelle vorgestellt. Hierdurch soll ein umfassender Überblick über die Nutzungsmöglichkeiten geboten werden und die Potenziale der Nutzung der Modelle sollen an konkreten Beispielen dargestellt werden.

Der Anspruch dieser Arbeit besteht darin, Maschinen- und Anlagenbauer sowie Zellhersteller durch die dargestellte Vorgehensweise – unter Einsatz der in den jeweiligen Kapiteln beschriebenen Tools und Methoden – dazu zu befähigen, eigene Maschinenmodelle für die Prozesse der Vereinzelung und Stapelbildung zu entwickeln. Diese Modelle sollen die Grundlage bieten, um gezielt Optimierungspotenziale für die Maschinenentwicklung, Inbetriebnahme und den Betrieb abzuleiten. Exemplarisch werden in dieser Arbeit zwei Anlagen des *wbk Institut für Produktionstechnik des KIT* betrachtet.

4 Aufgabendefinition und Systemanalyse

In diesem Kapitel werden als erste Schritte eine Aufgabendefinition und anschließend eine umfassende Systemanalyse durchgeführt.

4.1 Aufgabendefinition

Folgend werden die grundsätzlichen Ziele und Aufgaben der zu entwickelnden Modelle dargestellt. Diese sollen in erster Linie das maschinenseitige Verhalten und den Einfluss auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess mit einer ausreichenden Güte abbilden können. Die Modellgüte wird anhand der zu modellierenden Zielgrößen (siehe Herleitung in Kapitel 4.2) bemessen. Dabei sollen beispielsweise die zeitlichen Verläufe und Größenordnungen der entsprechenden Größen realitätsgetreu abgebildet werden. Eine ausführliche Erläuterung zur Validierung der Modellgüte erfolgt in Kapitel 8. Die spätere Anwendung der Modelle zielt auf drei Fälle ab, welche in der Abbildung 4-1 veranschaulicht werden und in Bezug zu den in Kapitel 2.3.2.1 dargestellten Potenzialen stehen. Neben der Generalisierbarkeit der Methode besteht der Anspruch dieser Arbeit auch darin, dass die Modelle für die dargestellten Anwendungsfälle einsetzbar sind. Die Bewertung dieses Anspruchs erfolgt anhand der exemplarischen Nutzung der Modelle in verschiedenen Szenarien zur Quantifizierung von Wirkzusammenhängen sowie zur Ableitung von Optimierungsansätzen für die drei Anwendungsfälle. Diese Ausarbeitungen werden in Kapitel 9 erläutert.

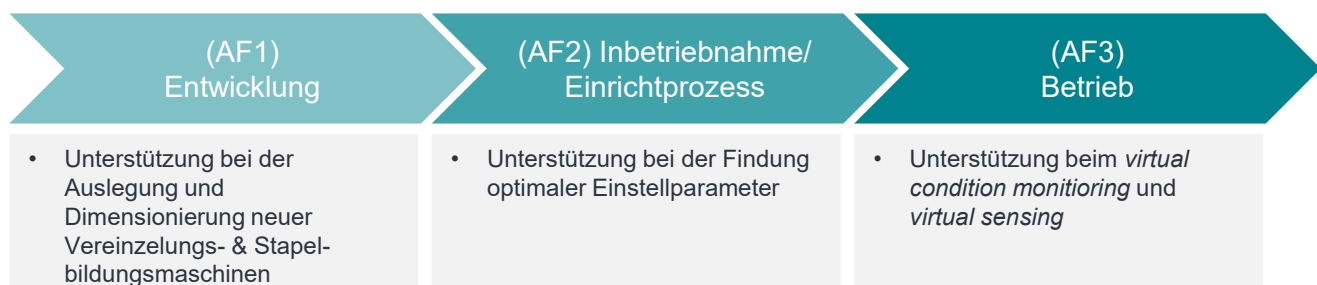


Abbildung 4-1: Anwendungsfälle der zu entwickelnden Modelle

Der erste Anwendungsfall (AF1) umfasst die Entwicklung neuer Vereinzelungs- und Stapelbildungsmaschinen. Vor dem Hintergrund der in Kapitel 2 dargestellten Vielfalt neuer Maschinenkonzepte für die Stapelbildung sollen die Modelle bei der Auslegung und Dimensionierung unterstützen. Um entsprechend neuartige Konzepte im Sinne einer wirtschaftlichen Vorgehensweise in den Markt zu bringen, ist es erforderlich, die

Wechselwirkungseffekte zwischen Maschine und Prozess und eventuelle Schwachstellen vor dem eigentlichen Bau der Maschine modellbasiert aufzudecken.

Der zweite Anwendungsfall (AF2) befasst sich mit den Prozessen der Inbetriebnahme und Einrichtung der Maschine. Ziel ist es, eine Unterstützung bei der Ermittlung optimaler Einstellparameter zu bieten und somit eine Steigerung der Effizienz anzustreben. Die potenziellen Vorteile, die in diesem Zusammenhang erreicht werden können, zielen darauf ab, den Materialausschuss und personelle Aufwände zu reduzieren.

Der dritte Anwendungsfall (AF3) widmet sich dem Betrieb der Maschine. Hierbei wird die Möglichkeit geschaffen, die entsprechenden Modelle zu verwenden, um beispielsweise eine virtuelle Zustandsüberwachung durchzuführen. Dies ermöglicht die Ermittlung von qualitätsrelevanten Parametern, die im Prozess nicht direkt messbar sind.

4.2 Systemanalyse

In diesem Kapitel werden zunächst die in dieser Arbeit betrachteten Maschinen für die Vereinzelung und Stapelbildung vorgestellt. Anschließend wird eine umfassende Systemanalyse vorgenommen. In diesem Kontext werden zunächst qualitätskritische, maschinenseitig beeinflusste Prozess- und Produktparameter identifiziert. Dieser Schritt dient in erster Linie dazu, entsprechende Zielgrößen für die späteren Modellierungstätigkeiten festzulegen. Abschließend erfolgen eine Analyse der Funktionen und Komponenten und eine Abstraktion der betrachteten Maschinen.

4.2.1 Vorstellung betrachteter Maschinen

Für die Arbeiten werden zwei Maschinen betrachtet, welche die Prozessschritte Vereinzeln und Stapeln ausführen. Bei den Maschinen handelt es sich zum einen um ein flexibles Vereinzelungsmodul und zum anderen um eine Z-Falt-Stapelmaschine. Die Betrachtung unterschiedlicher Maschinen soll die Generalisierbarkeit der hier vorgestellten Methodik und Vorgehensweise unterstreichen.

4.2.1.1 Vereinzelung: flexibles Vereinzelungsmodul

Bei dem flexiblen Vereinzelungsmodul handelt es sich um ein prototypisches Maschinenkonzept, welches am *wbk Institut für Produktionstechnik* entwickelt worden ist. Das flexible Vereinzelungsmodul ist eine Teileinheit eines Gesamtanlagenkonzeptes. Die Abbildung 4-2 veranschaulicht das Gesamtanlagenkonzept, genannt *EXINOS* (links), die Integration des flexiblen Vereinzelungsmoduls in das Gesamtanlagenkonzept sowie

das flexible Vereinzelungsmodul, genannt *Coil2Stack*, als eigenständige Maschine (rechts). Die dargestellten Konzepte haben das Ziel, wie in Kapitel 2.2.2.2 bereits beschrieben, die Produktivität und Flexibilität in der Vereinzelung und Stapelbildung zu erhöhen. Die generelle Entwicklung des Konzeptes ist Teil der in (Weinmann 2022) dargestellten Arbeiten. Mit dem Gesamtanlagenkonzept *EXINOS* werden zwei wesentliche Zielstellungen adressiert. Die erste ist die Ermöglichung einer Durchsatzsteigerung durch eine kontinuierliche Prozessführung. Die zweite Zielstellung ist die Ermöglichung einer flexiblen Herstellung von Zellstapeln unterschiedlichen Formates. Ein reales Bild des Gesamtanlagenkonzeptes ist in der Abbildung 4-3 dargestellt.

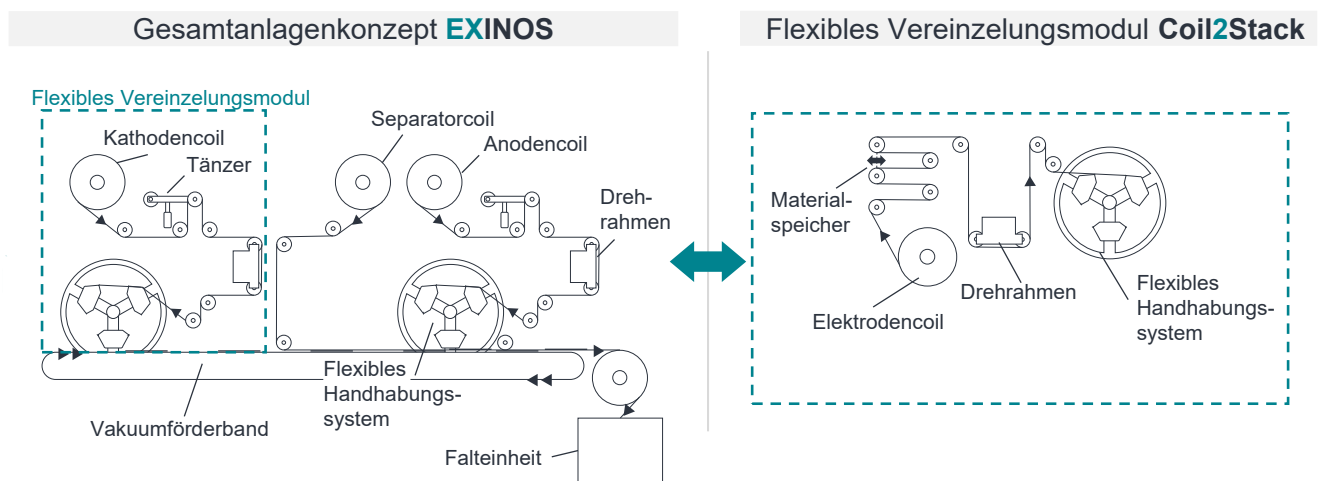


Abbildung 4-2: Maschinenkonzepte: Flexibles Vereinzelungsmodul Coil2Stack (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2022b)), Gesamtanlagenkonzept EXINOS (links) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))

Das Gesamtanlagenkonzept besteht aus vier übergeordneten Einheiten. Diese umfassen die flexible Vereinzelung des Anodenmaterials vom Coil, die flexible Vereinzelung des Kathodenmaterials vom Coil, die Verarbeitung des Separators und den Stapelaufbau mittels Falteinheit. Die flexible Vereinzelung der beiden Elektroden erfolgt analog. Zunächst werden die Elektroden vom Coil abgewickelt und dem flexiblen Vereinzelungsmodul zugeführt. Der Bahnzug im Material wird mittels Tänzersystem und Abwickler eingestellt. Die Messung erfolgt anhand einer Messwalze. Die Bahnkante wird mittels Drehrahmen und Stellantrieben an den Abwicklern geregelt. Die Messung der Bahnkante erfolgt mit Hilfe eines Infrarot-Bahnkantensensors. An dem flexiblen Handhabungssystem werden die Elektroden mittels Vakuumgreifern gegriffen und aufgewickelt. Innerhalb der Greifer ist eine pneumatisch betriebene Schnittvorrichtung inte-

griert. Mithilfe eines Scherschnittes werden Elektrodenblätter aus der Bahn heraus vereinzelt. Die Greifer selbst sind jeweils auf einer Lineareinheit montiert. Hierdurch wird ein Verstellen der Positionen der Greifer und somit ein Einstellen der zu vereinzelnenden Elektrodenblattlänge ermöglicht. Die vereinzelteten Kathodenblätter werden auf ein Vakuumförderband abgelegt, hier gegriffen und mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit weitertransportiert



Abbildung 4-3: Gesamtanlagenkonzept EXINOS (Bild: KIT/ Bramsiepe)

Auf die Beschichtung der Kathodenblätter wird punktuell ein Klebstoff in Form des elektrodeneneigenen Binders aufgetragen. Die Kathodenblätter werden anschließend an die Unterseite des Separators aufgeklebt. Diese Vorgehensweise erfolgt analog für das Anodenmaterial. Allerdings wird hierbei der Klebstoff auf die Oberfläche des Separators appliziert und die vereinzelteten Anodenblätter werden darauf abgelegt. Dieser Verbund, Separatorbahn mit aufgeklebten Elektrodenblättern, wird anschließend mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit in eine Falteinheit überführt. An dieser Stelle wird der Verbund mithilfe eines traversierenden Tisches und eines kippbaren Rollenkäfigs zu einem Zellstapel aufgebaut. Abbildung 4-4 veranschaulicht das reale flexible Vereinzelungsmodul *Coil2Stack* und das flexible Handhabungssystem im Detail (rechts).

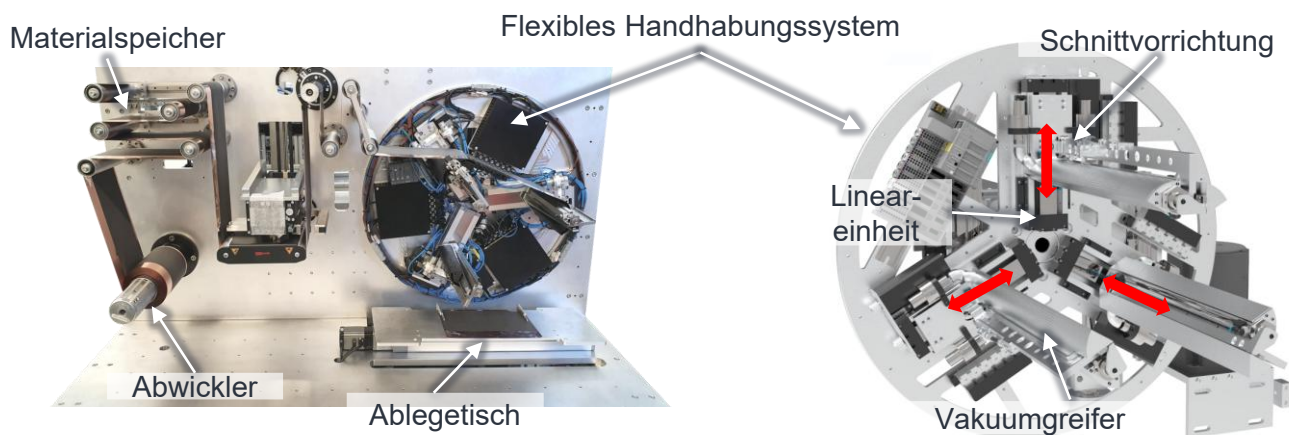


Abbildung 4-4: Flexibles Vereinzlungsmodul *Coil2Stack* (links), flexibles Handhabungssystem (rechts) (in Anlehnung an (Weinmann 2022))

Das flexible Vereinzlungsmodul *Coil2Stack* ist, wie das Gesamtanlagenkonzept *EXI-NOS*, ein eigener unabhängiger Aufbau am *wbk Institut für Produktionstechnik* und repräsentiert die Verarbeitung der Elektroden. Die grundlegende Funktionsweise ist analog zu den o. g. Darstellungen der flexiblen Vereinzlungsmodule im Gesamtanlagenkonzept. Im Vergleich werden die vereinzelter Elektrodenblätter auf einen Tisch abgelegt. Bei dem Materialspeicher handelt es sich um zwei Umlenkrollen, deren horizontale Position mittels Krafteinwirkung durch einen Pneumatikzylinder eingestellt wird. Hiermit besteht die Möglichkeit, den Bahnzug einzustellen und einen konstanten Materialfluss zu gewährleisten. Die Bahnzugregelung kann ebenfalls durch das Ansteuern des Abwicklers erfolgen. In der Darstellung des Handhabungssystems sind die erläuterten Komponenten der Vakuumgreifer, Schnittvorrichtungen und Lineareinheiten dargestellt. Die Maschine *Coil2Stack* ist Teil der nachfolgenden Ausarbeitungen in Bezug auf das flexible Vereinzlungsmodul.

4.2.1.2 Stapelbildung: Z-Falt-Stapelmaschine

Für den eigentlichen Prozessschritt der Stapelbildung wird eine weitere Maschine herangezogen. Hierbei handelt es sich um die Z-Falt-Stapelmaschine des Typs *GN-DP250A* des Unternehmens *SHANDONG GELON LIB CO., LIMITED*. Diese Maschine ist charakterisiert durch einen Z-Faltprozess, ähnlich zu der in Kapitel 2.2.2.2 beschriebenen Stapelmaschine. Abbildung 4-5 veranschaulicht das hier genutzte System.

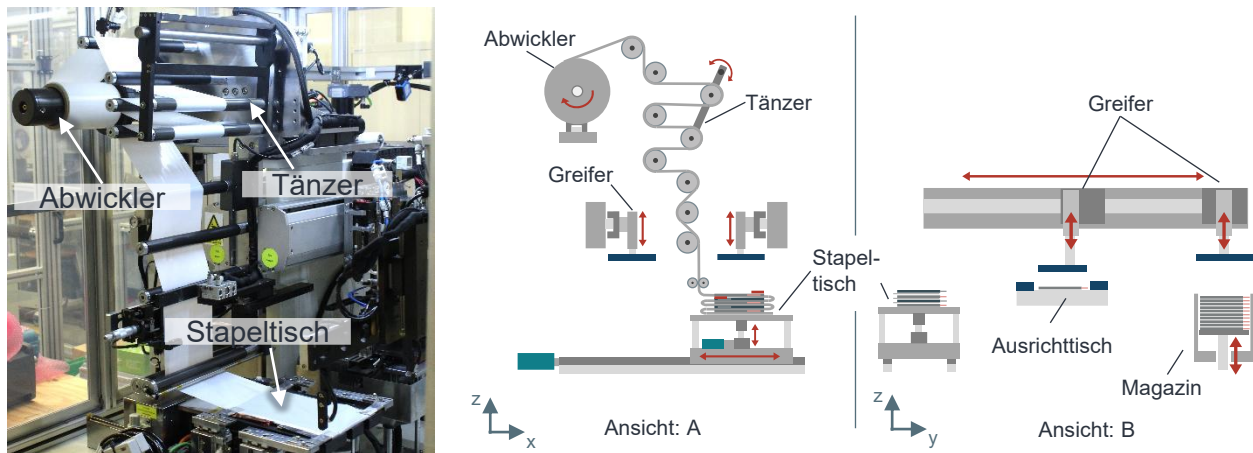


Abbildung 4-5: Z-Falt-Stapelmaschine: Realsystem (links), Konzept (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024b))

Es handelt sich um eine Stapelmaschine mit bewegtem Stapeltisch. Ansicht A verdeutlicht die Bahnführung des Separators. Ansicht B zeigt die Greifer, welche die Elektrodenblätter handhaben. Weiterhin erfolgt die Ausrichtung der Elektrodenblätter mittels mechanischer Anschläge. Bei dem Tänzer handelt es sich um zwei an einem Steg montierte Umlenkrollen. Mithilfe eines Pneumatikzylinders wird ein entsprechendes Moment an dem Tänzer umgesetzt. Hierbei wird lediglich der Druck im Zylinder eingestellt. In diesem System erfolgen keine Messung und aktive Regelung des Bahnzuges. Dieser wird lediglich über den konstanten Druck im Pneumatikzylinder in einem gewissen Bereich eingestellt. Ferner ist an dem Drehpunkt des Tänzers ein Drehgeber installiert, mit welchem sich der Auslenkwinkel messen lässt. Beim Überschreiten eines minimalen und maximalen Auslenkwinkels wird der Abwickler angesteuert. Dieser wickelt linear abhängig von dem Auslenkwinkel Material ab oder auf.

4.2.2 Identifikation maschinenseitig beeinflusster Kennwerte

Das Ziel dieses Kapitels ist zunächst die Ermittlung jener Fehler in dem Zwischenprodukt des Zellstapels, welche hauptsächlich durch den maschinellen Aufbau und das Maschinenverhalten beeinflusst werden. In darauffolgenden Vorbetrachtungen wird hierauf Bezug genommen.

4.2.2.1 Analyse des Zellstapels

Die Analyse der Fehler in einem Zellstapel und von deren Ursachen wird an dieser Stelle mithilfe einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) und in Anlehnung

an (DIN EN 60812 2006) durchgeführt. Hierdurch soll eine systematische Differenzierung zwischen material-, prozess- und maschinenseitigen Einflussfaktoren gegeben werden. Im Fokus steht hierbei ein Z-gefalteter Verbund mit vereinzelt Elektrodenblättern.

Die FMEA ist eine Methode, mit der sich mögliche Fehler in Produkten, Prozessen oder Systemen identifizieren und bewerten lassen. Dabei werden mögliche Auswirkungen dieser Fehler ermittelt und geeignete Maßnahmen zur Vermeidung oder Reduzierung der Fehler ergriffen. Der Schweregrad eines Fehlers wird mithilfe der Risikoprioritätszahl (RPZ) quantifiziert. Die Kennzahl dient dazu, Fehlerrisiken zu priorisieren. Die RPZ setzt sich aus drei Faktoren zusammen. Gleichung 4-1 veranschaulicht die Berechnung.

$$RPZ = BK * AW * EW \quad 4-1$$

Hierbei beschreibt der Faktor *BK* die Bedeutsamkeit eines Fehlers, *AW* die Auftretenswahrscheinlichkeit und *EW* die Entdeckungswahrscheinlichkeit. Die Faktoren werden jeweils von eins bis zehn bepunktet. So wird bspw. der Faktor *BK* bei einer Beeinflussung sicherheitstechnischer Aspekte hoch bewertet. Je höher die Bewertung bei der Entdeckungswahrscheinlichkeit ist, desto schwieriger ist es, einen Fehler zu identifizieren. Je höher der Wert des Faktors *AW*, desto höher ist die Auftretenswahrscheinlichkeit. (Brüggemann & Bremer 2015)

Tabelle 4-1 veranschaulicht die hier durchgeführte FMEA-Analyse. Die dargestellten Fehler und deren Bewertung beziehen sich auf Erfahrungswerte, Recherche und Expertengespräche. Ein Auszug dieser Analysen wird in (Kollenda et al. 2023) beschrieben. Zusätzlich zu der konventionellen Analyse wird der Haupteinflussfaktor hinzugezogen. Hierbei werden drei Unterscheidungen vorgenommen.

Tabelle 4-1: FMEA-Analyse

Möglicher Fehler	Mögliche Folgen	BK	Prozess	Mögliche Ursache	Haupt-einfluss-faktor	AW	EW	RPZ
Stapelge-nauigkeit nicht ausrei-chend (F1)	Beeinflus-sung Zellei-genschaf-ten (Perfor-mance)	7	Kalan-drieren	Materialinhomogenitäten in den Elektrodenblättern (Falten, Wellen) (U1.1)	Material	8	8	448
			Vereinzeln	Ungenauigkeiten in der Maßhaltigkeit der Elektrodenblätter aufgrund falsch eingestellten Soll-Bahnzugs (U1.2)	Prozess-führung	4	8	224
				Ungenauigkeiten in der Maßhaltigkeit der Elektrodenblätter aufgrund ungenauer Bahnzugregelung (U1.3)	Ma-schine	6	8	336
				Ungenauigkeiten in der Maßhaltigkeit der Elektrodenblätter aufgrund ungenauer Bahnführung (U1.4)	Ma-schine	4	4	112
			Stapeln	Falsches Ausrichten der Elektrodenblätter (U1.5)	Ma-schine	2	2	28
				Positioniergenauigkeit des Tisches beim Stapeln zu ungenau (U1.6)	Ma-schine	2	4	56
				Positioniergenauigkeit der Greifer beim Stapeln zu ungenau (U1.7)	Ma-schine	2	4	56
				Verrutschen der Elektrodenblätter im Stapel aufgrund falsch eingestellter Klemmfinger (U1.8)	Prozess-führung	3	4	84
Elektroden-blätter be-schädigt (F2)	Beeinflus-sung Zellei-genschaf-ten (Perfor-mance und Sicherheit)	10	Vereinzeln	Beschädigungen der Elektrodenblätter aufgrund falsch eingestellten Soll-Bahnzugs (U2.1)	Prozess-führung	3	3	90
				Beschädigungen der Elektrodenblätter aufgrund ungenauer Bahnzugregelung (U2.2)	Ma-schine	4	2	80
				Beschädigungen der Elektrodenblätter aufgrund ungenauer Bahnführung (U2.3)	Ma-schine	4	4	160
				Fehlerhaftes Schneiden aufgrund falsch eingestellter Klinge (U2.4)	Prozess-führung	4	6	240
				Generelle Inkompatibilität der Elektrodenbahn mit	Material	4	4	240

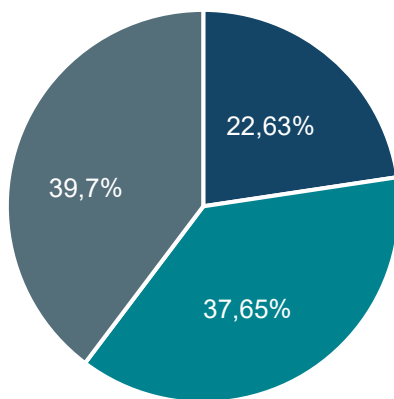
Möglicher Fehler	Mögliche Folgen	BK	Prozess	Mögliche Ursache	Haupt-einfluss-faktor	AW	EW	RPZ
				dem Prozess und der Maschine (z. B.: zu hohe Schichtdicken für Umlenkradien der Rollen) (U2.5)				
			Stapeln	Falsches Greifen während der Stapelbildung (durch z. B. falsch eingestellten Unterdruck) (U2.6)	Prozess-führung	3	4	120
				Beschädigung der Elektrodenblätter im Stapel aufgrund falsch eingestellter Klemmfinger (U2.7)	Prozess-führung	3	4	120
				Generelle Inkompatibilität der Elektrodenblätter mit dem Prozess und der Maschine (z. B.: Greifen aufgrund Welligkeiten nicht möglich) (U2.8)	Material	4	4	160
Separator beschädigt (F3)	Beeinflussung Zelleigenschaften (Performance und Sicherheit)	10	Stapeln	Beschädigungen des Separators aufgrund falsch eingestellten Soll-Bahnzugs (U3.1)	Prozess-führung	6	6	360
				Beschädigungen des Separators aufgrund ungenauer Bahnzugregelung (U3.2)	Ma-schine	6	6	360
				Beschädigungen des Separators aufgrund ungenauer Bahnführung (U3.3)	Ma-schine	4	4	160
				Generelle Inkompatibilität des Separators mit dem Prozess und der Maschine (U3.4)	Prozess-führung	2	2	40
BK = Bewertungszahl für die Bedeutsamkeit (1 bis 10) AW = Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit (1 bis 10) EW = Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit (1 bis 10) RPZ = Risikoprioritätszahl = B*AW*EW								

Bei dem Haupteinflussfaktor *Material* wird der Fehler hauptsächlich durch die Beschaffenheit des Eingangsmaterials beeinflusst. So können z. B. Welligkeiten, die durch den Prozess des Kalandrierens entstehen, die Stapelgenauigkeit beeinflussen (Mayer et al. 2023a). Der Haupteinflussfaktor *Prozessführung* bezieht sich vorwiegend auf falsch eingestellte Prozessparameter, welche entkoppelt von der Maschine zu betrachten

sind. So sind hier beispielsweise fehlerhafte Einstellungen von Soll-Bahnzügen zu nennen. Der Haupteinflussfaktor *Maschine* beschreibt die Einflüsse, welche durch das Maschinenverhalten beschrieben werden. So ist hier z. B. eine ungenaue Bahnzugregelung zu nennen.

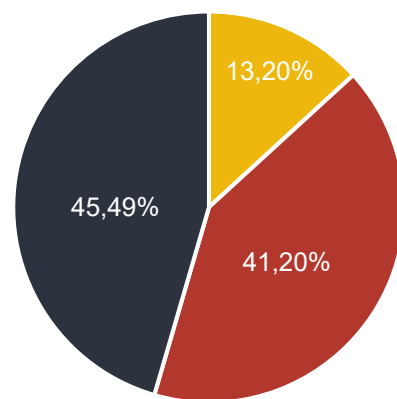
Insgesamt werden in dieser Analyse drei übergeordnete Fehler in einem Zellstapel identifiziert. Hierbei handelt es sich um eine unzureichende Stapelgenauigkeit, beschädigte Elektrodenblätter und einen beschädigten Separator. Materialbeschädigungen erhalten die höchstmögliche Bewertungszahl für die Bedeutsamkeit *BK*, da eine beschädigte Zelle keine Sicherheit gewährleisten kann. Eine unzureichende Stapelgenauigkeit beeinflusst (insofern die Ungenauigkeit nicht zu einem signifikanten Überlapp der Elektroden und zu einem Kurzschluss führt) in erster Linie die elektrochemischen Eigenschaften der Zelle (Leithoff et al. 2020). Abbildung 4-6 veranschaulicht die Anteile der Haupteinflussfaktoren und die Anteile der Prozesse auf die identifizierten Fehler in einem Zellstapel.

Anteile der Haupteinflussfaktoren



■ Material ■ Prozessführung ■ Maschine

Anteile der Prozesse



■ Kalandrieren ■ Vereinzeln ■ Stapeln

Abbildung 4-6: Anteile der Haupteinflussfaktoren und Anteile der Prozesse auf die Fehler in einem Zellstapel

Aus dieser Analyse geht hervor, dass die Einflüsse aus der Prozessführung und der Maschine bei der Vereinzelnung und der Stapelbildung am meisten ausgeprägt sind. Abbildung 4-7 veranschaulicht die Ergebnisse der durchgeführten FMEA-Analyse für die maschinenseitig bedingten Einflüsse. So werden hier die Fehler, welche primär

durch eine falsche Prozessführung bzw. das Material verursacht werden, nicht betrachtet.

Anhand der Analyse ist zu erkennen, dass insbesondere Beschädigungen des Separators aufgrund einer zu ungenauen Bahnzugregelung und Ungenauigkeiten der Elektrodenblätter aufgrund einer ungenauen Bahnzugregelung die wesentlichen maschinenseitig beeinflussten Ursachen sind.

Die zu modellierenden Zielgrößen dieser Betrachtungen sind daher die auftretenden Bahnzugschwankungen bei der Verarbeitung der Elektroden im Vereinzelungsprozess und die auftretenden Bahnzugschwankungen bei der Verarbeitung des Separators im Stapelbildungsprozess. Die auftretenden Schwankungen fungieren als Indikatoren zur Abschätzung der Zwischenproduktqualität des Zellstapels.

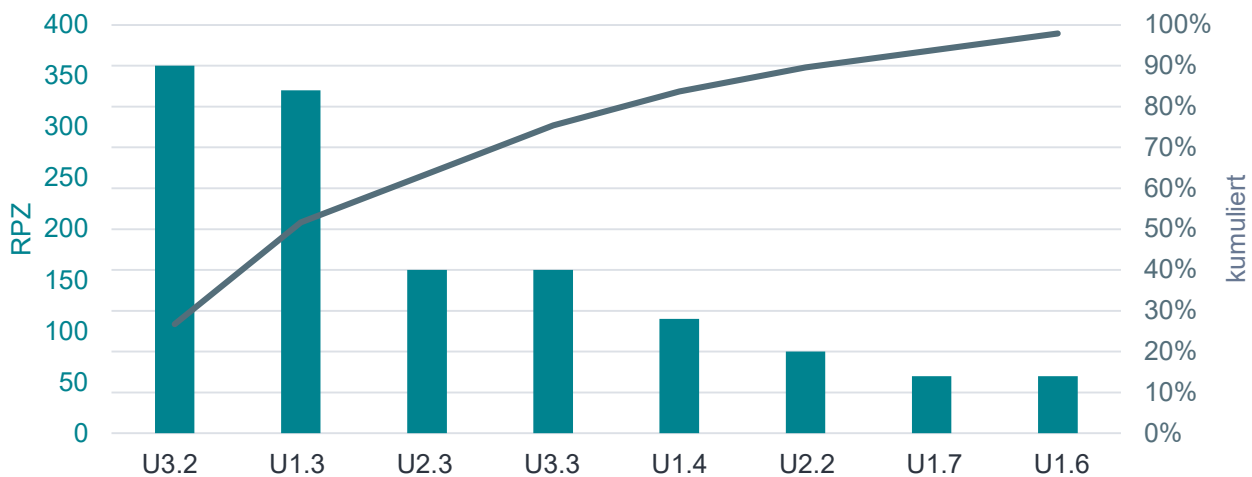


Abbildung 4-7: Auswertung der FMEA

Im nachfolgenden Abschnitt werden relevante Untersuchungen und Vorbetrachtungen dargelegt, welche die angesprochenen Problematiken in der Vereinzelung und Stapelbildung veranschaulichen.

4.2.2.2 Vorbetrachtungen – Vereinzelung

Die resultierende Maßhaltigkeit der vereinzelter Elektrodenblätter ist eine der wesentlichen Kenngrößen des Vereinzelungsprozesses. Im Folgenden wird dargestellt, wie sich Bahnzugschwankungen in der Elektrodenbahn während des Vereinzelungsprozesses auf die Längenabweichung der vereinzelter Elektrodenblätter auswirken. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die in (Kollenda et al. 2023) durchgeführten Arbeiten. Mittels zwei Versuchsaufbauten wurde Elektrodenmaterial in der dargestellten

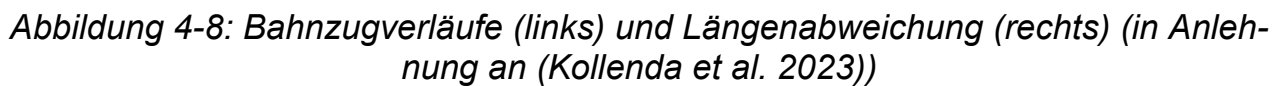
Coil2Stack-Maschine verarbeitet und vereinzelt. Hierbei wurden entsprechende auftretende Bahnzüge aufgenommen und die vereinzelt Elektrodenblätter mittels 3-D-Messsystem in ihrer Länge quantifiziert. Tabelle 4-2 zeigt die verwendeten Material- und Maschinenparameter. Das verarbeitete Material ist eine Graphit-Anode mit Kupfer-Trägermaterial.

Abbildung 4-8 veranschaulicht die mittels Messwalze aufgenommenen Bahnzugverläufe (links) und die Längenabweichung der vereinzelt Elektrodenblätter (rechts) für die zwei dargestellten Setups.

Tabelle 4-2: Material- und Maschinenparameter

Materialparameter		Maschinenparameter		
E-Modul [GPa]	54,6		Setup 1	Setup 2
Foliendicke [μm]	10	Soll-Blattlänge [mm]	160	200
Einseitige Beschichtungsdicke [μm]	73,5	Soll-Bahnzug [N]	10	15
Beschichtungsbreite [mm]	148	Bahngeschwindigkeit [mm/s]	8	12
Folienbreite [mm]	200			
Flächengewicht Folie [mg/mm^2]	0,09			
Flächengewicht Beschichtung [mg/mm^2]	0,07			

An dieser Stelle ist bereits erkennbar, dass die Schwankungen des Bahnzugs bei dem zweiten Setup höher ausgeprägt sind als bei dem ersten Setup. Dies liegt insbesondere an der erhöhten Bahngeschwindigkeit und der höheren Soll-Elektrodenblattlänge. Daneben ist auch der absolute Bahnzug beim zweiten Setup höher. Das liegt daran, dass hier ein höherer, zu regelnder Soll-Bahnzug definiert wurde.



Standardisierte Abweichung [-]

Längenabw. Setup 1 Längenabw. Setup 2 Bahnzug Setup 1 Bahnzug Setup 2

Maximum
3. Quartil
Median
1. Quartil
Minimum

Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurden die aufgenommenen Datensätze jeweils standardisiert. Die verwendete Berechnungsvorschrift ist in der Formel 4-2 dargestellt.

Hierbei beschreibt $\tau_{s,i}$ den standardisierten Datenpunkt, τ_i den nicht standardisierten Datenpunkt, $\bar{\tau}$ den Mittelwert des Datensatzes und s die Standardabweichung.

$$\tau_{s,i} = \frac{(\tau_i - \bar{\tau})}{s} \quad 4-2$$

Aus der vorliegenden Abbildung lässt sich ableiten, dass eine direkte Beziehung zwischen der Streuung des Bahnzugs während der Vereinzelung und der Maßhaltigkeit der einzelnen Elektrodenblätter besteht. Dies veranschaulicht die Notwendigkeit, einen gleichbleibenden Bahnzug während des Vereinzelungsprozesses anzustreben, um eine hohe Produktqualität zu gewährleisten.

4.2.2.3 Vorbetrachtungen – Stapeln

Bei der Stapelbildung spielt die beschädigungsfreie Handhabung der Separatoren eine essenzielle Rolle, die maßgeblich von den auftretenden Bahnzügen im zu verarbeitenden Material bestimmt wird. Diese Herausforderung wird besonders deutlich aufgrund der unterschiedlich ausgeprägten Verhaltensweisen der Materialien. Dies ist vor allem anhand der mechanischen Kennwerte zu erkennen. Abbildung 4-10 veranschaulicht auf der linken Seite das Zugkraft-Dehnungs-Diagramm zweier Separatormaterialien. Dabei handelt es sich um einen Polymerseparator mit einer Dicke von 9 μm und einen keramisch beschichteten Vliesstoff-Separator mit einer Gesamtdicke von 30 μm . Zudem wird auf der rechten Seite die Beschaffenheit der Proben nach der Materialprüfung dargestellt. Es wird deutlich, dass sich das Materialverhalten der beiden Separatoren signifikant voneinander unterscheidet. Der Vliesstoff-Separator weist eine deutlich geringere Bruchdehnung, Zugfestigkeit und plastische Verformungsfähigkeit auf. Der betrachtete Polymerseparator zeichnet sich vor allem durch einen hohen plastischen Verformungsgrad aus. Hierdurch soll vor allem die Herausforderung dargestellt werden, die sich bei der Verarbeitung von Separatoren während der Stapelbildung ergibt. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf ein zu schnelles Materialversagen durch Bruch bzw. Folienriss und auf eine während des Prozesses nicht erkennbare plastische Verformung des Separators. Eine detaillierte Materialcharakterisierung wird in dem Kapitel 7.2.1.2 vorgestellt.

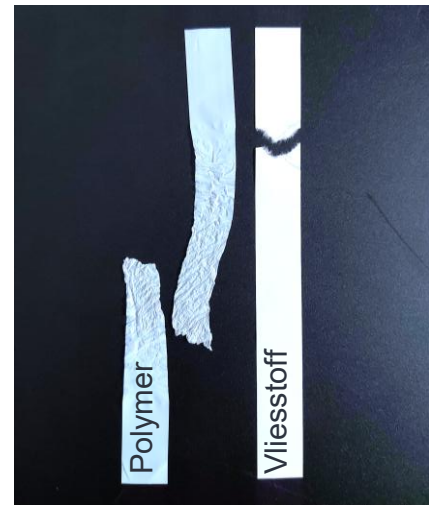
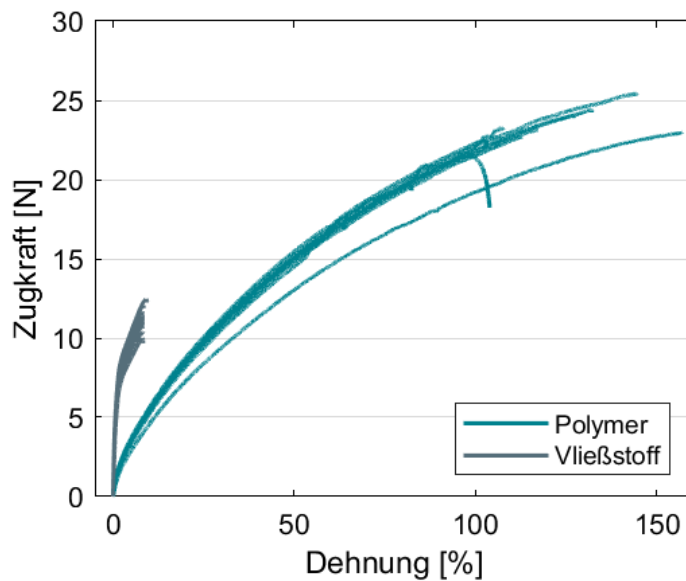


Abbildung 4-10: Zugkraft-Dehnungsdiagramm von Separatoren (links) und Probenbeschaffenheit (rechts) (in Anlehnung an (A_Boschert 2023))

4.2.3 Maschinenanalyse

Als Teil der Systemanalyse ist es notwendig, die Funktionalität und die technischen Teilsysteme der betrachteten Maschinen zu erfassen. Im Folgenden wird eine umfassende Analyse der betrachteten Maschinen präsentiert. Angesichts der in der Aufgabendefinition dargestellten Anwendungsfälle kann diese Analyse sowohl für sich in der Entwicklung befindende als auch für bereits bestehende Anlagen angewendet werden. Die Analyse orientiert sich am methodischen Vorgehen zur Definition einer Funktionsstruktur (Bender et al. 2018). Neben der Funktionsdefinition wird auch die jeweilige technische Komponente dargestellt. Abbildung 4-11 veranschaulicht qualitativ den Aufbau der Funktionsstruktur. Die Analyse beinhaltet eine tiefgreifende Auseinandersetzung mit den verbauten Komponenten, ihrer Funktion, den davon ausgehenden Wirkmechanismen und der Betrachtung entsprechender Material- und Medienflüsse. In der Analyse wird zwischen drei übergeordneten Flüssen unterschieden. Unter dem mechanischen Wirkfluss sind sämtliche mechanischen Wirkprinzipien zwischen den Komponenten zu verstehen. Dazu gehören beispielsweise das Umwandeln einer rotatorischen Bewegung in eine lineare Bewegung, das Einbringen eines Übersetzungsverhältnisses oder das Ausfahren eines Pneumatikzylinders. Der elektrisch-digitale Informationsfluss beschreibt im Wesentlichen das Ansteuern der entsprechenden Komponenten im System. Hierunter fallen Aspekte wie das Schalten von Druckventilen, das Ansteuern von Antrieben und die Verarbeitung von Sensorsignalen. Die Material- und Medienflüsse

Bahnführung Elektrode

Steuerung

Handhabungssystem

Ablegeeinheit

◻➞ Materialfluss der Elektroden
 ➞➞➞ Materialfluss Druckluft
 - - - Elektrisch-Digitaler Informationsfluss

Bei der Z-Falt-Stapelmaschine erfolgt die Unterteilung in fünf übergeordnete Aspekte: Steuerung, Verarbeitung des Separators, Verarbeitung der Anodenblätter, Verarbeitung der Kathodenblätter und die eigentliche Stapelbildung. Die Verarbeitung des Separators umfasst sämtliche Umlenkrollen, den Abwickler und Bahnkanten-/Bahnzugregelungssysteme. Die Verarbeitung der Anoden- und Kathodenblätter beinhaltet alle Greifsysteme, Ausrichteinheiten und Antriebstechniken, die zur Förderung der Elektrodenblätter zur Stapeleinheit dienen. Die Stapelbildung umfasst den Stapeltisch inklusive der damit zusammenhängenden Komponenten wie z. B. Klemmfinger und Antriebe. Die Analyse zeigt, dass die Gesamtsysteme vorwiegend aus mechanischen und pneumatischen Komponenten bestehen. Die Realisierung der grundlegenden Bewegungsabläufe wird mittels Servoantrieben durchgeführt.

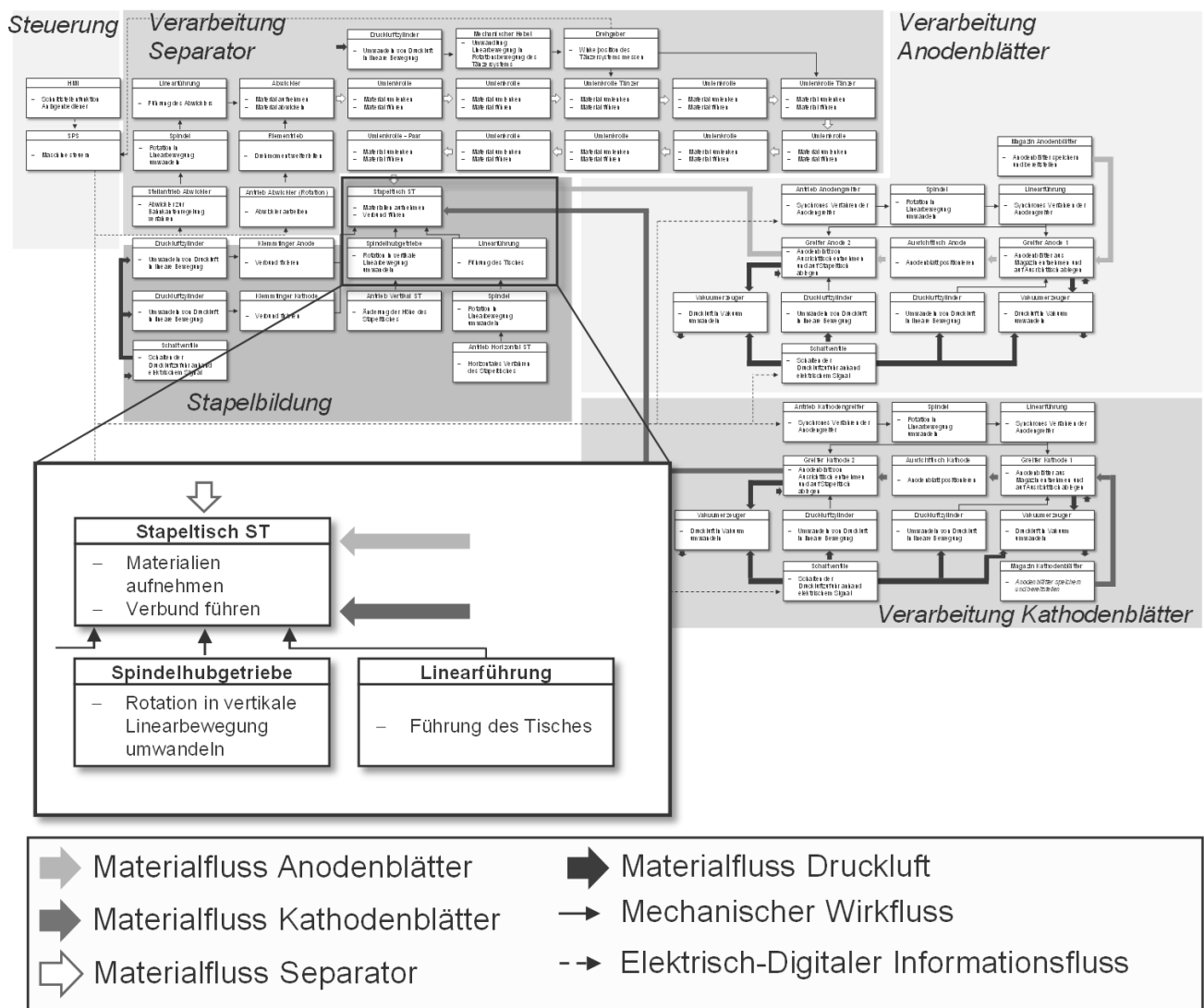


Abbildung 4-13: Analyse der Funktionsstruktur der Z-Falt-Stapelmaschine (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024b))

4.2.4 Zusammenfassung: Anforderungsdefinition und Systemanalyse

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für die zu entwickelnden Modelle drei wesentliche Anforderungen definiert wurden. Die Modelle sollen die Möglichkeit bieten, die maschinenseitigen Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess zu quantifizieren und in den Phasen der Maschinenentwicklung (AF1), der Inbetriebnahme bzw. der Einrichtung der Maschine (AF2) sowie während des Betriebs (AF3) zu erfassen und zu unterstützen. Die wesentliche zu modellierende Zielgröße ist der auftretende Bahnzug bei der Verarbeitung der Elektroden- und Separatorbahnen. Zum Beispiel lassen sich in der Vereinzelung Korrelationen zwischen Bahnzugschwankungen und der Maßhaltigkeit der Elektrodenblätter feststellen. Bei der Stapelbildung führen insbesondere die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Separatoren zu einem

Materialversagen oder zu einer nicht offensichtlichen plastischen Verformung. Schwankungen des Separatorbahnzugs während des Prozesses führen zudem zu Ungenauigkeiten im Zellstapel. Die Erfassung der maschinenseitigen Einflussfaktoren auf den Bahnzug erfordert ein tiefgreifendes Verständnis der verbauten Komponenten, ihrer Funktionen und des Materialflusses in der Maschine. Hierzu wurde eine Analyse der Funktionsstruktur durchgeführt. Diese Analyse dient als initiale Grundlage, um in den folgenden Ausarbeitungen die zu modellierenden Komponenten, Funktionen und deren Detaillierungsgrade zu identifizieren und zu definieren.

5 Modellierungsaspekte und Detaillierung

Nachdem in Kapitel 4 die zu modellierende Zielgröße – der Bahnzug in den Elektroden- und Separatorbahnen – sowie die verbauten Komponenten und deren Funktionen in den betrachteten Maschinen definiert und analysiert worden sind, besteht das Ziel der folgenden Ausarbeitungen darin, diejenigen Komponenten zu identifizieren, die einen ausschlaggebenden Einfluss auf die Zielgröße haben. Hierdurch soll gewährleistet werden, dass der Fokus in der späteren Modellentwicklung richtig gelegt wird, um den entstehenden Aufwand so minimal wie möglich zu halten. Darüber hinaus ist es von essenzieller Bedeutung, den entsprechenden Detaillierungsgrad der Modellierung einzelner Komponenten festzulegen. Das Vorgehen gliedert sich in zwei übergeordnete Schritte. Zunächst werden die zu modellierenden Aspekte vor dem Hintergrund der definierten Zielgröße ermittelt und ihre Einflussfähigkeit wird definiert. Im zweiten Schritt erfolgen die Ableitung und Zuordnung entsprechender Detaillierungsgrade. Die Vorgehensweise richtet sich nach den in (Husseini et al. 2024b) beschriebenen Arbeiten.

5.1 Identifikation und Bewertung der zu modellierenden Aspekte

In den folgenden Ausarbeitungen erfolgt die Beschreibung des methodischen Vorgehens zur Identifikation der zu modellierenden Aspekte und von deren Einflüssen auf das Gesamtsystem. Abbildung 5-1 veranschaulicht die hier gewählte Vorgehensweise. Für die Identifikation und Bewertung der zu modellierenden Aspekte bzw. Komponenten wird zunächst im Rahmen einer Design Structure Matrix (DSM) die Vernetzung der einzelnen Komponenten im Gesamtsystem untereinander klassifiziert und bewertet. Das Ziel hierbei ist es, die Komponenten herauszustellen, die das Verhalten der betrachteten Maschinen und des Systems maßgeblich beeinflussen. Darauf aufbauend erfolgt eine Verknüpfung der gewonnenen Erkenntnisse mit einer Nutzwertanalyse (NWA). Diese hat das Ziel, basierend auf den in Kapitel 3 definierten Kriterien die einzelnen Komponenten unter Berücksichtigung der DSM-Analyse zu bewerten. Das Ergebnis ist eine Gesamtbewertung der Komponenten und Aspekte in der Maschine. Diese Gesamtbewertung wird anschließend dazu genutzt, den Detaillierungsgrad der Modellierung zu definieren.

1.) Design Structure Matrix (DSM)

	A	B	C	...	DSM_{aktiv}
Komponente A		3	1	0	0 = 12
Komponente B	3		0	1	(... 25
Komponente C	1	0		1	3 10
...	1	1	3		0 :
	1	0	0	3	

0 = Kein Einfluss
1 = Geringer Einfluss
3 = Hoher Einfluss

Bewertung der Einflüsse und Vernetztheit der Komponenten im Gesamtsystem

2.) Erweiterte Nutzwertanalyse (NWA)

Komponente	DSM_{aktiv}	Bewertung B_1 (Kriterium 1)	Gewichtung G_1 (Kriterium 1)	$B_1 * G_1$ (Kriterium 1)	Bewertung B_2 (Kriterium 2)	$B_i * G_i$ (Kriterium i)	Summe gew. Kriterien	Gesamt- Bewertung B_{ges}
A	12	1	0,3	0,3	3	0,9	5,2	62,4
B	25	1	0,3	0,3	X	...	...	...
C	10	3	0,3	0,9	...	...	...	...
...	...	...	0,3	...	...	...	...	...
...	...	...	0,3	...	...	...	...	...

0 = Kein Einfluss
1 = Geringer Einfluss
3 = Hoher Einfluss

Bewertung der Einflüsse der Komponenten auf ausgewählte Kriterien und Ableitung einer Gesamtbewertung

Abbildung 5-1: Vorgehensweise zur Identifikation und Bewertung der zu modellierenden Aspekte

Im Folgenden wird die Ausarbeitung der DSM für die betrachtete Vereinzelungs- und Stapelbildungsmaschine dargestellt. Beim Aufbau der DSM werden die in Kapitel 4.2.3 definierten Komponenten zu der Analyse der Funktionsstrukturen in einer Matrix gegenübergestellt. Anschließend wird ein paarweiser Vergleich der Komponenten miteinander vorgenommen. Auf Basis des Vergleichs erfolgt eine Bewertung, inwieweit die Komponente der jeweiligen betrachteten Zeile die weiteren Komponenten aus den Spalten beeinflusst. Einen Einfluss kann beispielsweise eine Signal- oder Kraftübertragung darstellen. Die Bewertung wird mithilfe einer 3-stufigen Bepunktung durchgeführt. Die Vergabe von 3 Punkten bedeutet, dass der Einfluss der betrachteten Komponente auf die jeweilige andere Komponente der Spalte hoch einzustufen ist. Die Vergabe von 1 Punkt bedeutet, dass der Einfluss geringfügig ist. 0 Punkte sagen aus, dass kein Einfluss existent ist. Im Anschluss hieran erfolgt das Aufsummieren der vergebenen Punkte. Die Summe in einer Zeile wird als Aktivsumme bezeichnet. Diese gibt den Grad der Vernetztheit bzw. den Grad der Einflussfähigkeit einer Komponente im Gesamtsystem an. Die Summe in einer Spalte wird als Passivsumme bezeichnet. Diese gibt an, in welchem Ausmaß eine Komponente im Gesamtsystem beeinflusst wird. Eine detaillierte Beschreibung zu der Methodik der DSM wird in (Danilovic & Browning 2007) dargestellt.

[illegible]

Abbildung 5-2: Design Structure Matrix der Z-Falt-Stapelmaschine

Tabelle 5-1 zeigt einen Auszug der zehn höchstbewerteten Komponenten und deren Aktivsummen für das flexible Vereinzelungsmodul und die Z-Falt-Stapelmaschine. Es wird deutlich, dass insbesondere die Antriebstechnik und Kernkomponenten, wie der Stapeltisch und das Handhabungssystem, in Summe in den Betrachtungen den höchsten Vernetzungsgrad aufweisen.

Tabelle 5-1: Auszug der Ergebnisse der DSM-Analyse

Komponenten des flexiblen Vereinzelungsmoduls	Aktivsumme aus der DSM – Ver- einzeln	Komponenten der Z-Falt- Stapelmaschine	Aktivsumme aus der DSM – Sta- peln
Antrieb Abwickler (Rotation)	28	Stapeltisch	20
Elektrodenbahn	28	Antrieb – Stapeltisch (hori- zontal)	20
Handhabungssystem Grund- platte	27	Abwickler (inkl. Coil)	15
Proportional Regelventil	19	Antrieb – Abwickler (Rota- tion)	15
Druckluftzylinder Material- speicher	19	Antrieb – Anodengreifer	15
Abwickler inkl. Coil	18	Antrieb – Kathodengreifer	15
Umlenkrollen	16	Druckluftzylinder Tänzer	14
Wegaufnehmer	16	Schaltventile Greifer Anode	14
Antrieb Handhabungssystem – vertikal	13	Schaltventile Greifer Ka- thode	14
Drehrahmen	12	Umlenkrollen	13
...	...	...	...

In einem nächsten Schritt erfolgt die Kopplung der Aktivsumme aus der DSM mit einer Nutzwertanalyse. Bei der Nutzwertanalyse werden die Komponenten anhand von gewichteten Kriterien bewertet (Kühnapfel 2019). Abbildung 5-1 und Gleichung 5-1 veranschaulichen die Berechnungsvorschrift für die Gesamtbewertung B_{ges} einer Komponente. B_i ist eine erneute Bewertung der Komponente im Hinblick auf die Fähigkeit, ein Kriterium zu beeinflussen. Die Punktevergabe erfolgt analog zu der DSM. G_i beschreibt die prozentuale Gewichtung eines Kriteriums.

$$B_{ges} = DSM_{aktiv} * \sum_i (B_i * G_i) \quad 5-1$$

Die Auswahl der Bewertungskriterien und deren Gewichtung beziehen sich auf die in Kapitel 4.2.2 identifizierten maschinenseitig beeinflussten Fehlerursachen für die Vereinzelung und Stapelbildung. Der Fokus liegt nach wie vor auf dem Bahnzug, da die Bahnverarbeitung maschinenseitig stark beeinflusst wird. Aus diesem Grund werden

die bereits abgeleiteten Ursachen herangezogen, welche im Kern die auftretenden Fehler bei der Bahnverarbeitung beschreiben. Die Gewichtung erfolgt anhand der identifizierten Risikoprioritätszahlen. Tabelle 5-2 veranschaulicht die Kriterien und deren prozentuale Gewichtung für den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess. Die ermittelten prozentualen Werte fließen im Anschluss hieran in die Kalkulation der Gesamtbewertung der Komponenten ein.

Tabelle 5-2: Bewertungskriterien und ihre Gewichtung

Auf den Vereinzelungsprozess bezogene Kriterien	RPZ – Vereinzelung	G	Auf den Stapelprozess bezogene Kriterien	RPZ – Stapeln	G
Ungenauigkeiten in der Maßhaltigkeit der Elektrodenblätter aufgrund ungenauer Bahnzugregelung	336	49,84 %	Beschädigungen des Separators aufgrund ungenauer Bahnzugregelung	360	56,96 %
Beschädigungen der Elektrodenblätter aufgrund ungenauer Bahnführung	160	23,26 %	Beschädigungen des Separators aufgrund ungenauer Bahnführung	160	25,32 %
Ungenauigkeiten in der Maßhaltigkeit der Elektrodenblätter aufgrund ungenauer Bahnführung	112	16,28 %	Positioniergenauigkeit der Greifer beim Stapeln zu ungenau	56	8,86 %
Beschädigungen der Elektrodenblätter aufgrund ungenauer Bahnzugregelung	80	11,63 %	Positioniergenauigkeit des Tisches beim Stapeln zu ungenau	56	8,86 %

Tabelle 5-3 veranschaulicht ausschnittsweise die Ergebnisse der Gesamtbewertung der Komponenten für das flexible Vereinzelungsmodul und die Z-Falt-Stapelmaschine. Die gesamte Tabelle inkl. der Aufschlüsselung der Nummerierung ist dem Anhang A zu entnehmen.

Zu erkennen ist, dass die höchstbewerteten Komponenten für beide Maschinen insbesondere die Antriebstechnik, Rollensysteme und Peripheriegeräte wie z. B. Druckluftzylinder und Regelventile zur Bahnzugregelung sind. Weiterhin sind die zu verarbeitenden Materialbahnen vergleichsweise hoch bewertet. Dies ist insbesondere durch die starke Konnektivität der Materialien mit den einzelnen Bauteilen zu begründen.

Beim flexiblen Vereinzelungsmodul sind die einzelnen Greifer und insbesondere die Ablegeeinheit geringer bewertet. Dies lässt sich damit begründen, dass diese Komponenten, bei der Beaufschlagung eines ausreichenden Volumenstroms, keinen unmittelbar signifikanten Einfluss auf die Prozessqualität der Bahnverarbeitung und vor allem die Bahnzugregelung haben. Bei der Z-Falt-Stapelmaschine ist insgesamt die Verarbeitung der Elektrodenblätter mit den dazugehörigen Komponenten geringer bewertet, da diese keinen direkten Einfluss auf die Bahnverarbeitung des Separators haben. Der Antrieb des Abwicklers ist bei dem flexiblen Vereinzelungsmodul höher bewertet, da mit diesem eine aktive Regelung des Bahnzugs vorgenommen wird.

Tabelle 5-3: Auszug: Gesamtbewertung der Komponenten

Nr.	Flexibles Vereinzelungsmodul		Z-Falt-Stapelmaschine	
	Bezeichnung	B_{ges}	Bezeichnung	B_{ges}
K1	Antrieb – Abwickler (Rotation)	84,00	Antrieb – Stapeltisch (horizontal)	44,56
K2	Elektrodenbahn	84,00	Stapeltisch	44,56
K3	Abwickler inkl. Coil	54,00	Abwickler (inkl. Coil)	37,03
K4	Umlenkrollen	48,00	Umlenkrollen	32,09
K5	Proportional Regelventil	44,01	Antrieb – Abwickler (Rotation)	29,43
K6	Druckluftzylinder Materialspeicher	44,01	Druckluftzylinder Tänzer	27,47
K7	Wegaufnehmer	37,06	Umlenkrolle Tänzer	23,54
K8	Antrieb Handhabungssystem – vertikal	25,67	Mechanischer Hebel bzw. Rotationseinheit – Tänzer	17,66
K9	Handhabungssystem Grundplatte	22,56	Riementrieb – Abwickler	17,66
K10	Messwalze	12,00	Separator	17,28
...	...	...	...	...

5.2 Ableitung der Detaillierungsgrade

Nachdem die einzelnen Komponenten und Aspekte analysiert und bewertet worden sind, erfolgt die Ableitung der jeweiligen Detaillierungsgrade der Modellierung. Es wird darauf abgezielt, diejenigen Komponenten, die hoch bewertet wurden, in den Modellen detaillierter zu beschreiben als die niedrig bewerteten Komponenten. Hierdurch soll die Modellierung möglichst effizient gestaltet werden, ohne die spätere Rechenzeit der Modelle übermäßig zu erhöhen.

Das Vorgehen sieht an dieser Stelle eine Klassifizierung der Komponenten gemäß einer ABC-Analyse vor. Das prinzipielle Vorgehen wird in (Ultsch & Lötsch 2015) näher beschrieben. Im Folgenden werden die Komponenten anhand ihrer im vorherigen Kapitel ermittelten Gesamtbewertung in drei Gruppen eingeteilt. Diese belaufen sich auf *Hoher Detaillierungsgrad*, *Mittlerer Detaillierungsgrad* und *Keine Modellierung*. Die

Komponenten, welche 80 % der Summe aller Gesamtbewertungen ausmachen, werden der Gruppe *Hoher Detaillierungsgrad* zugewiesen. Diese Komponenten werden in den anschließenden Modellierungstätigkeiten detaillierter abgebildet. Die Komponenten, welche hierauf aufbauend die nächsten 15 % der Summe aller Gesamtbewertungen ausmachen, werden der Gruppe *Mittlerer Detaillierungsgrad* zugewiesen. Die restlichen Komponenten werden nicht in die Modellierungstätigkeiten aufgenommen. Abbildung 5-3 veranschaulicht die Kategorisierung der einzelnen Komponenten. Die Details sind ebenfalls dem Anhang A zu entnehmen.

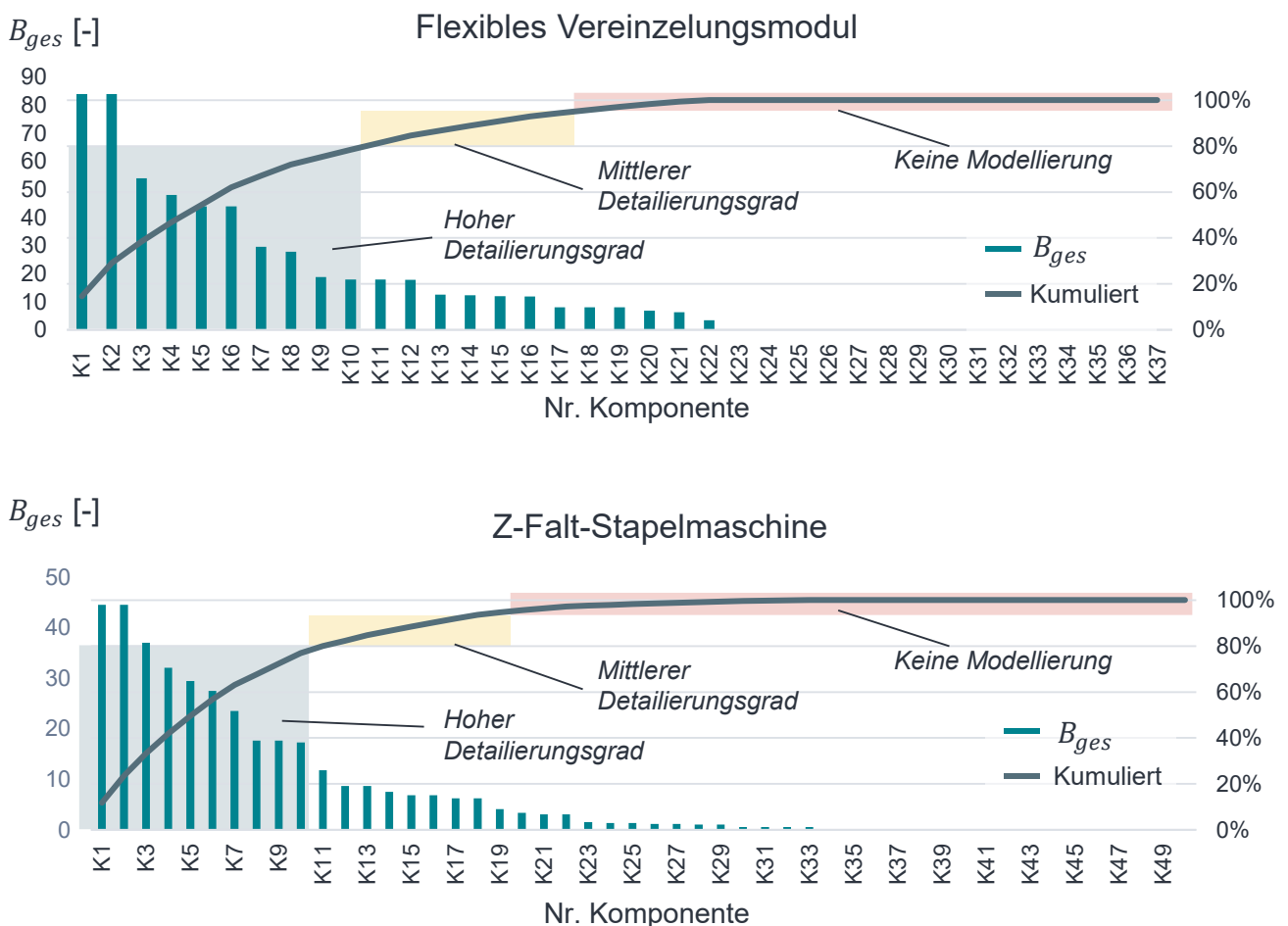


Abbildung 5-3: Detaillierungsgrade für die Modellierung – Kategorisierung der Komponenten

Hierdurch wird deutlich, dass die Komponenten, die insbesondere die Bahnverarbeitung der Elektroden bei der Vereinzelung und den Separator bei der Stapelbildung beeinflussen, in die Kategorie *Hoher Detaillierungsgrad* fallen. Die Komponenten, die eine eher passive Rolle einnehmen, jedoch für die gesamte Systemkonnektivität in den Ma-

schinen benötigt werden, sind unter der Kategorie *Mittlerer Detaillierungsgrad* eingeordnet. Die restlichen Komponenten werden nicht modelliert, da sie weder Einfluss auf die Bahnverarbeitung haben noch eine signifikante Relevanz für die Systemkonnektivität im zu entwickelnden Modell aufweisen. Ein Großteil der Komponenten fällt in die dritte Kategorie und wird daher von den Modellierungstätigkeiten ausgenommen. Dies hat dazu geführt, dass der vermeintlich angenommene hohe Aufwand für die Modellierung auf die wesentlichen Komponenten beschränkt und somit reduziert wurde.

Im Folgenden ist anhand der Kategorisierung festzulegen, welche Parameter zur Modellierung der einzelnen Komponenten herangezogen werden. Hierzu werden die Komponenten nach ihrer Art der Funktionsweise in verschiedene Komponenten-Kategorien eingeteilt. Die Kategorisierung basiert auf dem dominanten physikalischen Wirkprinzip der Komponenten und ihrer Funktion im Gesamtsystem und ist angelehnt an (DIN EN IEC 81346-2 2019).

- Mechanische Komponente (M)
- Elektromechanische Komponente (ME)
- Elektrische Informationskomponente (EI)
- Pneumatische Komponente (P)
- Zu verarbeitendes Material (MAT)

Zu den mechanischen Komponenten gehören beispielsweise Umlenkrollen, Linearführungen und Spindeln. Die eingebauten (Servo-)Antriebe werden den elektromechanischen Komponenten zugeordnet. Elektrische Informationskomponenten umfassen z. B. die Signalverarbeitung der Daten von installierten Sensoren. Pneumatische Komponenten beinhalten unter anderem die Druckluftzylinder. Die Elektroden und Separatoren fallen in die Kategorie des zu verarbeitenden Materials.

Die Abbildung 5-4 zeigt eine qualitative Unterscheidung der Detaillierungsgrade für die unterschiedlichen Komponenten-Kategorien mit entsprechenden Beispielen. Die Einteilung der einzelnen Komponenten gemäß ihren Detaillierungsgraden ist bereits abgeschlossen. Der Vollständigkeit halber werden für das Verständnis jedoch die Unterschiede zwischen dem mittleren und dem hohen Modellierungsgrad aufgezeigt. Dies soll insbesondere dazu dienen, den Gedankengang hinter der grundlegenden Unterscheidung deutlicher zu machen.

Im mittleren Detaillierungsgrad, bei den mechanischen Komponenten (M), werden Geometrien idealisiert und Reibungs- sowie Trägheitseffekte vernachlässigt. Die Modellierung konzentriert sich hierbei auf die grundlegende kinematische Funktion sowie die erforderlichen Kraftflüsse. Als Beispiel wird für die Umlenkrollen angenommen, dass sie ideal rund sind und keine Reibung oder Trägheit aufweisen. Im hohen Detaillierungsgrad werden die zuvor vernachlässigten Aspekte berücksichtigt. Hier werden beispielsweise die Unrundheit der Umlenkrolle sowie die entsprechende Lagerreibung und Trägheit in das entsprechende Teilmodell integriert.

Der Unterschied zwischen mittlerem und hohem Detaillierungsgrad ist bei den mechanisch-elektrischen Komponenten (ME) ähnlich. Beim mittleren Detaillierungsgrad werden ebenfalls Reibungs- und Trägheitseffekte vernachlässigt. Dabei liegt das Ziel darin, die entsprechenden Funktionen idealisiert darzustellen. So werden zum Beispiel bei einem Antrieb die regelungstechnischen Charakteristiken wie das Verzögerungs- oder Anlaufverhalten vernachlässigt. Beim hohen Detaillierungsgrad werden diese vernachlässigten Aspekte hingegen berücksichtigt.

Unter den elektrischen Informationskomponenten (EI), zu denen hauptsächlich Sensoren und die Signalverarbeitung gehören, erfolgt die Unterscheidung primär im Detaillierungsgrad der genannten Signalverarbeitung. Diese Detaillierung steht weitestgehend in Beziehung zum Steuerungsablauf der Maschinen, der in der SPS umgesetzt wird. Der Fokus des mittleren Detaillierungsgrads liegt darauf, die Daten der Sensoren an den entsprechenden Positionen zugänglich zu machen, ohne eine umfangreichere Verarbeitung vorzusehen. Der hohe Detaillierungsgrad beinhaltet die entsprechende Verarbeitung. Ein Beispiel hierfür wäre die Regelung von Komponenten auf Basis dieser Signale.

Beim mittleren Detaillierungsgrad der pneumatischen Komponenten (P) liegt der Schwerpunkt ebenfalls auf der Darstellung der grundlegenden Funktionen. Hierbei werden insbesondere Reibeffekte oder Eigenheiten des verwendeten Mediums in der Komponente vernachlässigt. Im hohen Detaillierungsgrad werden diese hingegen berücksichtigt. Als Beispiel dient die Beschreibung eines Druckluftzylinders: Im mittleren Detaillierungsgrad wird er durch die Approximation einer konstant wirkenden Kraft charakterisiert. Im hohen Detaillierungsgrad erfolgt die Beschreibung unter Einbeziehung von spezifischen Reibwerten und dem idealen Gasgesetz.

Die Modellierung des Materials (MAT) spielt im Rahmen des Ziels dieser Arbeit, nämlich die Auswirkungen der maschinenseitigen Einflüsse darzustellen, eine besondere Rolle.

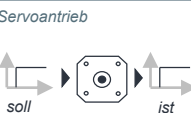
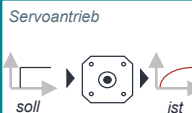
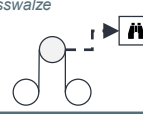
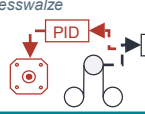
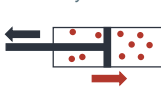
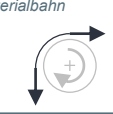
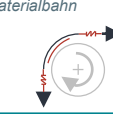
Art	Mittlerer Detaillierungsgrad	Hoher Detaillierungsgrad
M	– Ideale Geometrie – Ideal reibungsfrei – Grundlegende Kinematik – Keine Trägheit 	– Erweiterte Geometrie – Integration Reibung – Integration Trägheit 
ME	– Keine regelungstechnischen Charakteristiken – Ideale Umsetzung der geforderten Kinematik – Keine Trägheit 	– Integration der regelungstechnischen Charakteristiken – Integration Trägheit 
EI	– Generelles Vorsehen, Daten abzugreifen 	– Detaillierte Darstellung der Regelkreise & Kopplung der Signale an die entsprechenden Komponenten 
P	– Ideal reibungsfrei – Grundlegende Kinematik – Approximation Zylindermedium 	– Integration Reibung – Beschreibung Zylindermedium 
MAT	– Ideal reibungsfrei – Ideal dehnungsfrei 	– Integration Reibung – Integration von Dehnungseffekten 

Abbildung 5-4: Qualitative Unterscheidung der Detaillierungsgrade

Der Fokus liegt hierbei nicht auf einer tiefgreifenden Darstellung des Materialverhaltens, wie beispielsweise der Faltenbildung. Es existieren bereits einschlägige wissenschaftliche Arbeiten in diesem Bereich. Ein Beispiel dafür ist die Ausarbeitung von (Aydemir 2021), wobei der Schwerpunkt hauptsächlich auf der detaillierten Modellierung der Auswirkungen unterschiedlicher Prozessführungen auf das Materialverhalten liegt. Diese Arbeit versteht sich vielmehr als eine Erweiterung dieser Ansätze um die maschinenseitigen Aspekte. Aus diesem Grund liegt der Fokus bei der Modellierung des Materials insbesondere darauf, relevante Schnittstellen zur Maschine abzubilden. Im mittleren Detaillierungsgrad wird das Material wiederum als ideal approximiert. Reibeffekte zwischen den Umlenkrollen und der Materialoberfläche sowie eine Dehnung des Materials werden vernachlässigt. Hingegen werden im hohen Detaillierungsgrad Reibeffekte, Dehnung und etwaige Gewichtsparmeter zur Darstellung der Trägheit berücksichtigt. Die genauen Annahmen und Randbedingungen werden in Kapitel 6 aufgegriffen.

5.3 Zusammenfassung: Modellierungsaspekte und Detaillierung

Das Ziel dieses Kapitels bestand darin, die Bewertung der einzelnen Komponenten im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Modellierung zu realisieren und anschließend die Festlegung der erforderlichen Detaillierungsgrade vorzunehmen. Zu Beginn wurde die Konnektivität der einzelnen Komponenten im Gesamtsystem mithilfe einer DSM ermittelt. Die Ergebnisse dieser Analyse wurden im nächsten Schritt mit einer NWA kombiniert. Dabei flossen die definierten Kriterien aus Kapitel 4.2.2 ein, und unter Verwendung der jeweiligen RPZ wurde eine Bewertung für jede einzelne Komponente berechnet. Die Gesamtbewertung dieser Komponenten spiegelt ihre Modellierungsrelevanz wider. Basierend darauf wurde eine Klassifizierung in drei Kategorien vorgenommen: Komponenten, die einen mittleren oder hohen Detaillierungsgrad in der Modellierung erfordern, und solche, die nicht modelliert werden müssen. Es wird deutlich, dass Antriebssysteme und Komponenten, die einen direkten Einfluss auf die Bahnverarbeitung haben, mit einem hohen Detaillierungsgrad abgebildet werden müssen.

6 Modellformalisierung

In diesem Kapitel werden der konkrete Modellaufbau und die Vernetzung der einzelnen Teilmodelle zu einem Gesamtanlagenmodell beschrieben. Für die Modellformalisierung und die Realisierung der Gesamtanlagenmodelle wird primär auf die Simulationssoftware *Simcenter Amesim* zurückgegriffen. Es handelt sich hierbei um eine Systemsimulationsplattform zur Abbildung multiphysikalischer Zusammenhänge (Rückert et al. 2023). Für die folgenden Ausarbeitungen werden entsprechende Modellbausteine der verfügbaren Bibliotheken genutzt und ggf. angepasst und erweitert. Die verwendeten physikalischen Zusammenhänge können den wissenschaftlichen Grundlagen zugeordnet werden. Im Fokus steht nicht die Ausarbeitung neuer Zusammenhänge, sondern vielmehr die Nutzung von, dem Detaillierungsgrad angepassten, Zusammenhängen sowie deren Kopplung zu Gesamtmaschinenmodellen. Zum Verständnis werden die wichtigsten Zusammenhänge in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

6.1 Modellierung der Einzelkomponenten

In diesem Kapitel werden die wesentlichen physikalischen Zusammenhänge verdeutlicht, die zur Simulation der Einzelkomponenten herangezogen werden. Die Ausarbeitungen beziehen sich hierbei vornehmlich auf die Modellierung der Komponenten mit einem hohen Detaillierungsgrad. Dadurch soll ein umfassender Überblick vermittelt werden, um somit das Verständnis der Gesamtmodelle zu verbessern.

6.1.1 Materialbahnen

Zunächst werden die erforderlichen physikalischen Zusammenhänge für die Modellierung der Elektroden- und Separatorbahnen beschrieben. Diese Zusammenhänge basieren grundlegend auf dem Massenerhaltungssatz und werden in den Arbeiten von (Branca et al. 2013; Whitworth & Harrison 1983) und in (Siemens PLM Software 2023) erläutert und angewandt. Die Zusammenhänge werden im Folgenden zusammengefasst. Für die Beschreibungen wird das in Abbildung 6-1 dargestellte Bahnsegment betrachtet. Die Modellierung des Bahnsegmentes erfolgt im eindimensionalen Raum. Daher wird es in ein Linienelement umgewandelt, das zwischen den Punkten i und $i+1$ verläuft. Die Breite B und Dicke d und somit auch die Querschnittsfläche A bleiben in dem Linienelement erhalten und sind konstant. Ebenso wird der E-Modul E des Bahnsegmentes als konstant angenommen.

Zunächst werden die Orts- und dazugehörige Geschwindigkeitsvektoren der Punkte definiert. Gleichung 6-1 veranschaulicht den Ortsvektor, Gleichung 6-2 den dazugehörigen Geschwindigkeitsvektor. Die z-Komponente wird aufgrund des in Maschinenrichtung wirkenden Bahnzugs, welcher sich ausschließlich in x - y -Ebene befindet, vernachlässigt.

$$\vec{r}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad 6-1$$

$$\vec{v}_i = \begin{bmatrix} v_{x,i} \\ v_{y,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} \quad 6-2$$

mit

x_i = x -Position des Punktes i

y_i = y -Position des Punktes i

$v_{x,i}$ = Geschwindigkeit in x -Richtung an Position i

$v_{y,i}$ = Geschwindigkeit in y -Richtung an Position i

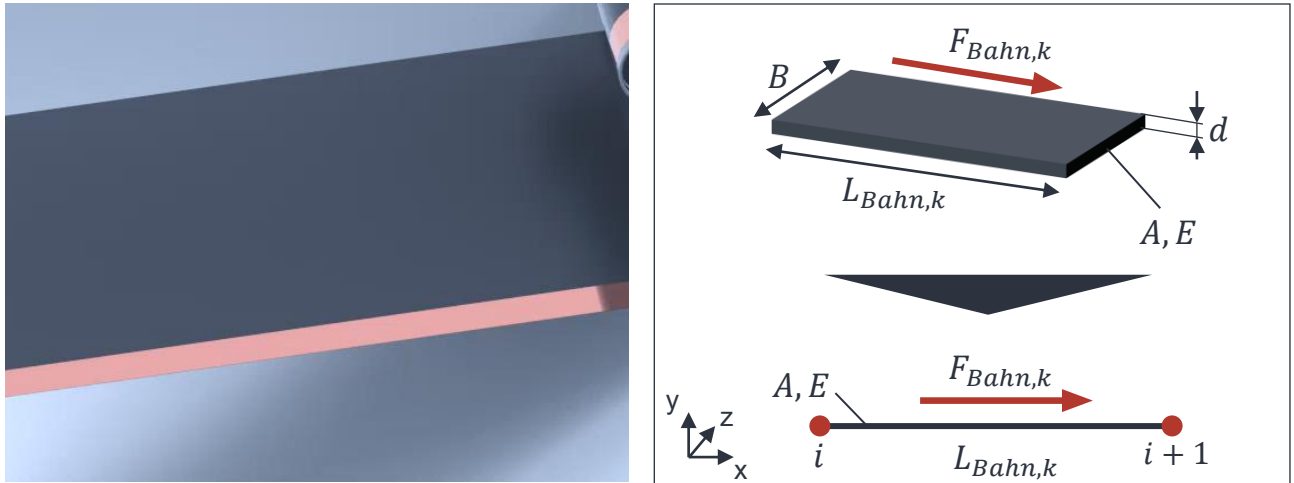


Abbildung 6-1: Überführung eines Bahnsegments k in ein eindimensionales Modell zwischen den Punkten i und $i+1$

Die Länge der Bahn entspricht dem euklidischen Abstand $L_{Bahn,k}$ zwischen den beiden Punkten i und $i+1$. Die Berechnung im Fall einer zweidimensionalen Betrachtung ist in Gleichung 6-3 definiert. Die zeitliche Änderungsrate der Bahnstreckenlänge, dargestellt durch $\dot{L}_{Bahn,k}$, sowie die ungedehnte Ausgangslänge $L_{Bahn,k,0}$ werden mithilfe von Gleichung 6-4 und Gleichung 6-5 berechnet.

$$L_{Bahn,k} = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad 6-3$$

$$\dot{L}_{Bahn,k} = \frac{(x_i - x_{i-1}) * (v_{x,i} - v_{x,i-1}) + (y_i - y_{i-1}) * (v_{y,i} - v_{y,i-1})}{L_{Bahn,k}} \quad 6-4$$

$$L_{Bahn,k,0} = \frac{L_{Bahn,K}}{1 + \varepsilon_{Bahn,k}} \quad 6-5$$

mit

$$\varepsilon_{Bahn,k} = \text{Dehnung im Bahnsegment } k$$

Nachfolgend wird auf die Dehnungsrate $\dot{\varepsilon}_{Bahn,k}$ eingegangen. Diese setzt sich vor dem Hintergrund einer Massenerhaltung nach (Branca et al. 2013) aus der Dehnung im aktuellen Bahnabschnitt $\varepsilon_{Bahn,k}$ und der Dehnung aus dem vorangegangenen Bahnabschnitt $\varepsilon_{Bahn,k-1}$ zusammen. Die Berechnung der Dehnungsrate ist in Gleichung 6-6 definiert.

$$\dot{\varepsilon}_{Bahn,k} = \frac{(\varepsilon_{Bahn,k} + 1)^2 * (\frac{\dot{L}_{Bahn,k}}{\varepsilon_{Bahn,k} + 1} + \frac{v_i}{\varepsilon_{Bahn,k} + 1} - \frac{v_{i-1}}{\varepsilon_{Bahn,k-1} + 1})}{L_{Bahn,k}} \quad 6-6$$

mit

$$\varepsilon_{Bahn,k-1} = \text{Dehnung im Bahnabschnitt } k - 1$$

Ausgehend davon lassen sich anschließend der Bahnzug $F_{Bahn,k}$ und gemäß dem Hooke'schen Gesetz die Bahnspannung $\sigma_{Bahn,k}$ in dem jeweiligen Segment ableiten. Die Berechnung des Bahnzugs $F_{Bahn,k}$ ist in Gleichung 6-7 und die Bestimmung der Bahnspannung in der Gleichung 6-8 dargestellt.

$$F_{Bahn,k} = -(E * A * \varepsilon_{Bahn,k} + R_{vis} * (\dot{L}_{Bahn,k} - v_i - v_{i-1})) \quad 6-7$$

$$\sigma_{Bahn,k} = \frac{F_{Bahn,k}}{A} = \frac{F_{Bahn,k}}{B * d} = E * \varepsilon_{Bahn,k} \quad 6-8$$

mit

$$A = \text{Querschnittsfläche}$$

$$B = \text{Breite des Materials (konstant)}$$

$$d = \text{Dicke des Materials (konstant)}$$

$$E = \text{Elastizitätsmodul (E-Modul)}$$

$$R_{vis} = \text{Viskoser Reibungskoeffizient im Bahnmaterial}$$

In den Berechnungen wird zusätzlich das viskose Verhalten der Materialbahn durch den Koeffizienten R_{vis} dargestellt. Das viskose Materialbahnverhalten wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Dieses ist abhängig von der Dehnrate. Wie in (Aydemir 2021) beschrieben, werden in den Prozessen keine hohen Dehnraten erwartet, sodass diese Vereinfachung getroffen werden kann.

Als Schnittstelle zu anderen Bahnsegmenten oder Komponenten wie z. B. Umlenkrollen werden nach (Siemens PLM Software 2023) zusätzlich die auftretenden Kräfte an den Punkten i und $i + 1$ definiert. Die Gleichungen 6-9 bis 6-12 veranschaulichen die Berechnungsvorschrift der auftretenden Kräfte in x- und y-Richtung. Zusätzlich fließt hier noch die Gewichtskraft des Bahnsegments in die Berechnungen mit ein. Zur Vollständigkeit wird hier ebenfalls die Gewichtskraft in x-Richtung dargestellt. In der Anwendung tritt diese aber nicht auf.

$$F_{x,i} = \frac{F_{Bahn,k} * (x_i - x_{i+1})}{L_{Bahn,k}} + F_{x,Gewicht} \quad 6-9$$

$$F_{y,i} = \frac{F_{Bahn,k} * (y_i - y_{i+1})}{L_{Bahn,k}} + F_{y,Gewicht} \quad 6-10$$

$$F_{x,i+1} = -F_{x,i} \quad 6-11$$

$$F_{y,i+1} = -F_{y,i} \quad 6-12$$

mit

$F_{x,Gewicht}$ = Gewichtskraft der Bahn in x-Richtung

$F_{y,Gewicht}$ = Gewichtskraft der Bahn in y-Richtung

Gemäß der angewandten Nomenklatur wird der Bahnzug unter Zugbeanspruchung als eine negative Kraft dargestellt. Druckbeanspruchungen finden bei biegeschlaffen Materialien keine Berücksichtigung. Daher wird im Weiteren der Bahnzug zugunsten der Einfachheit als absoluter Wert behandelt, wodurch der Bahnzug als positiv-semidefinit angesehen wird.

6.1.2 Mechanische Komponenten

Im Anschluss an die Beschreibungen zur Modellierung des Materials wird im Folgenden auf die Beschreibung einiger essenzieller mechanischer Komponenten näher eingegangen.

Umlenkrollen

Zunächst wird die Modellierung der Umlenkrollen als eine der Kernkomponenten erläutert. Sämtliche Rollen, inkl. der Komponente des Drehrahmens, werden anhand dieser Grundlagen modellbasiert dargestellt. Abbildung 6-2 zeigt den schematischen Aufbau einer Umlenkrolle. Hierbei wird das Material umgelenkt, ohne dass ein äußeres Moment auf die Komponente aufgebracht wird.

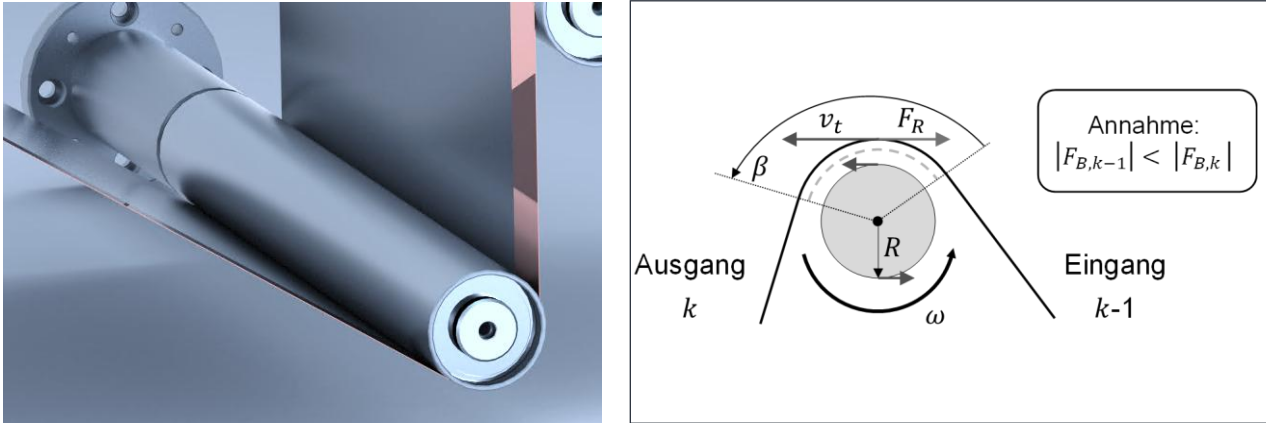


Abbildung 6-2: Umlenkung der Bahn um eine Rolle

Auftretende Reib- und Schlupfeffekte erfordern eine hohe Aufmerksamkeit. Die folgenden Zusammenhänge werden in (Whitworth & Harrison 1983) dargestellt. Zunächst wird die Tangentialbeschleunigung $\dot{v}_t$ anhand der Gleichung 6-13 definiert.

$$\dot{v}_t = \frac{R^2}{J} * (F_{Bahn,k} - F_{Bahn,k-1}) - \frac{K_{R,L} * R - K_{R,L,vis} * v_t}{J} \quad 6-13$$

$$K_{R,L} = R * \mu_{R,L} * (F_{Bahn,k} - F_{Bahn,k-1}) \quad 6-14$$

mit

R = Radius der Rolle

J = Massenträgheitsmoment der Rolle

$K_{R,L}$ = Lager-Reibmoment

$K_{R,L,vis}$ = Viskoses-Lager-Reibwertanteil

v_t = Tangentialgeschwindigkeit

$\mu_{R,L}$ = Lagerreibwert

Die viskosen Reibungseffekte werden für die anschließende Modellierung vernachlässigt. Die verbauten Wälzlager der Rollen weisen entweder keine oder nur eine sehr geringfügige Schmierung auf. Die Berechnung des Lagerreibmoments wird in der Gleichung 6-14 dargestellt. Hierbei beschreibt $\mu_{R,L}$ den Lagerreibwert, in welchen sowohl Rollreibungs- als auch Gleitreibungseffekte einfließen (Jacobs 2014). Aufbauend hierauf soll die Relativbewegung zwischen der Materialbahn und Umlenkrolle (gen. Schlupf) dargestellt werden. Sofern Reibung im Allgemeinen betrachtet wird, kann der Bahnzug mittels *Euler-Eytelwein-Gleichung* (Gleichung 6-15) wiedergegeben werden (Spura 2016). Um die Gleitreibung darstellen zu können, wird das Coloumb'sche Reib-

modell in Gleichung 6-16 eingeführt. Hierbei beschreibt F_C die Coloumb'sche-Reibungskraft. Abhängig vom Reibungsfall, Haften oder Gleiten, wird der entsprechende Reibungskoeffizient für die Berechnungen herangezogen.

$$F_{Bahn,k} = F_{Bahn,k-1} * \exp(\mu * |\beta|) \quad 6-15$$

$$F_C = F_{Bahn,k} * \mu_{dyn} \quad 6-16$$

mit

β = Umschlingungswinkel der Bahn um die Rolle

μ = Reibungskoeffizient

Zusätzlich zur Unterscheidung zwischen den Reibungsarten wird weiterhin eine Differenzierung je nach Richtung des wirkenden Bahnzugs vorgenommen. Diese Fallunterscheidung wird in der Gleichung 6-17 definiert. Vor diesem Hintergrund wird nach (Siemens PLM Software 2023) die Reibkraft berechnet. Diese Beschreibungen und Zusammenhänge werden auch als *Reset-Integrator-Modell* bezeichnet (Haessig & Friedland B. 1991).

$$F_R \begin{cases} F_{stat} = \begin{cases} F_{Bahn,k-1} * \exp(\mu * \beta) * \mu, & |F_{Bahn,k-1}| < |F_{Bahn,k}| \\ F_{Bahn,k-1} * \exp(-\mu * \beta) * \mu, & |F_{Bahn,k-1}| > |F_{Bahn,k}| \end{cases}, \mu = \mu_{stat}, v_{rel} = 0 \\ F_C = \begin{cases} F_{Bahn,k-1} * \exp(\mu * \beta) * \mu, & |F_{Bahn,k-1}| < |F_{Bahn,k}| \\ F_{Bahn,k-1} * \exp(-\mu * \beta) * \mu, & |F_{Bahn,k-1}| > |F_{Bahn,k}| \end{cases}, \mu = \mu_{dyn}, v_{rel} \neq 0 \end{cases} \quad 6-17$$

mit

β = Umschlingungswinkel der Bahn um die Rolle

μ_{dyn} = Dynamischer Gleitreibungskoeffizient

μ_{stat} = Statischer Haftreibungskoeffizient

v_{rel} = Relative Geschwindigkeit zwischen Rolle und Bahn

Vor diesem Hintergrund wird die Gleichung 6-13 um die Reibkraft F_R erweitert. Der vollständige Zusammenhang wird in der Gleichung 6-18 veranschaulicht.

$$\dot{v}_t = \frac{R^2}{J} * (F_{Bahn,k} - F_{Bahn,k-1}) - \frac{K_{R,L} * R - K_{R,L,vis} * v_t}{J} - \frac{F_R * R}{J} \quad 6-18$$

Insbesondere wurden die Umlenkrollen als diejenigen Komponenten identifiziert, die einen besonders hohen Einfluss auf die definierten Kriterien haben. Vor diesem Hintergrund besteht auch die Notwendigkeit, den Einfluss der Exzentrizität der Umlenkrollen zu modellieren. Der Einfluss der Exzentrizität auf das Verhalten der Umlenkrollen wird durch das Verschieben des Rollenmittelpunktes mit einer definierten Geschwindigkeit

modelliert (Siemens PLM Software 2023). Die Zusammenhänge werden in den Gleichungen 6-19 und 6-20 veranschaulicht.

$$v_{R,x} = -\sin\left(\frac{\theta}{180 * \pi}\right) * \frac{\epsilon * \omega}{2} \quad 6-19$$

$$v_{R,y} = \cos\left(\frac{\theta}{180 * \pi}\right) * \frac{\epsilon * \omega}{2} \quad 6-20$$

mit

$v_{R,x}$ = Geschwindigkeit um den Rollenmittelpunkt in x-Richtung

$v_{R,y}$ = Geschwindigkeit um den Rollenmittelpunkt in y-Richtung

θ_R = Drehwinkel der Rolle

ω_R = Winkelgeschwindigkeit der Rolle

ϵ = Exzentrizität der Rolle

Linearführungen

Die Modellierung der Linearführung erfolgt vor dem Hintergrund einer bewegten Masse mit Reibung zwischen der Masse und der Linearführung. Die Berechnungsvorschriften verlaufen im Wesentlichen analog zu der Beschreibung der Umlenkrollen. Die Abbildung 6-3 veranschaulicht schematisch die auftretenden Kräfte bei einer bewegten Masse, welche beispielsweise die des Stapeltisches in der Z-Falt-Stapelmaschine sein kann.

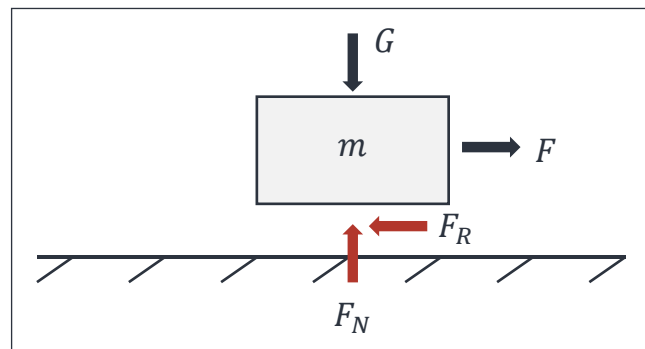
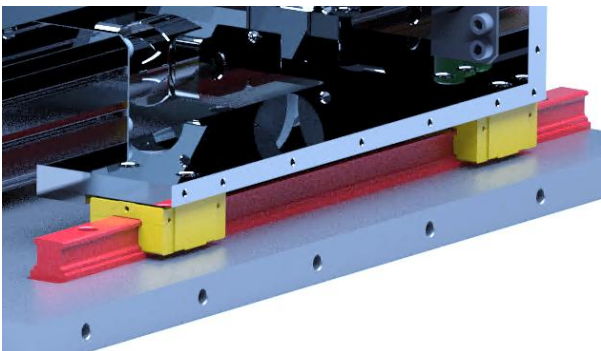


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung einer bewegten Masse mit Reibung (in Anlehnung an (Spura 2016))

An dieser Stelle wird ebenfalls das Coloumb'sche Reibungsgesetz herangezogen (Gleichung 6-21). Bei den Linearführungen handelt es sich um Kugelumlaufführungen. Für die Reibwerte wird daher in der späteren Parametrierung der Rollreibungswert hinzugezogen. Viskose Reibeffekte in Folge der Schmierung werden aufgrund des anzunehmenden geringen Einflusses vernachlässigt.

$$F_R = \mu_{Roll} * F_N \quad 6-21$$

$$\eta_{LF} = \frac{F - F_R}{F} \quad 6-22$$

mit

F_N = Normalkraft

G = Gewichtskraft

μ_{Roll} = Rollreibungswert

η_{LF} = Wirkungsgrad Linearführung

Die auftretende Reibung schlägt sich in dem Wirkungsgrad η_{LF} der Linearführung nieder. Dessen Berechnung ist in der Gleichung 6-22 dargestellt.

Spindeln

Bei den verbauten und zu modellierenden Spindeln handelt es sich um Kugelgewindespindeln. Die generelle Funktion dieser Komponente ist das Umwandeln eines Drehmomentes in eine axiale Kraft. Die Abbildung 6-4 veranschaulicht schematisch die Funktionsweise eines Spindelantriebs.

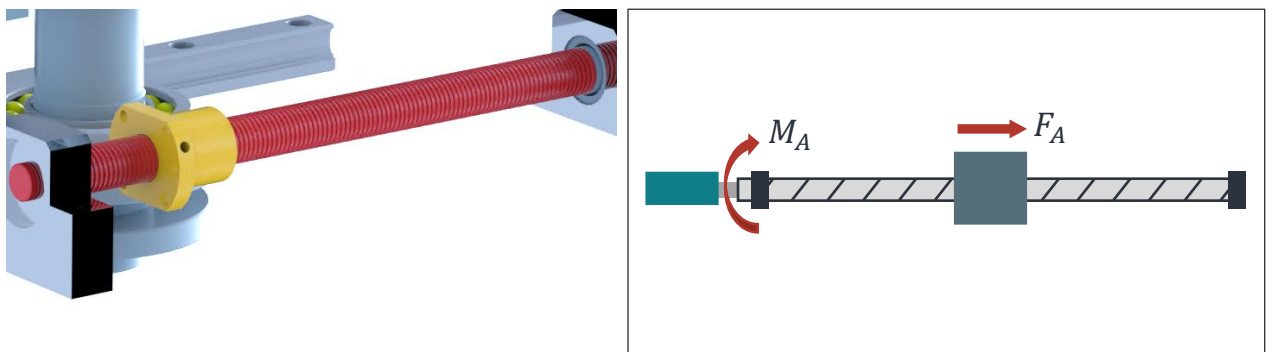


Abbildung 6-4: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Kugelgewindespindel

Der für die Modellierung ausschlaggebende Zusammenhang zwischen Antriebsmoment M_A und Axialkraft F_A ist in der Gleichung 6-23 definiert (Schmalzhaf et al. 2013).

$$F_A = \frac{M_A * 2\pi * \eta_S}{P_H} \quad 6-23$$

mit

M_A = Antriebsmoment

η_S = Wirkungsgrad der Spindel

P_H = Spindelsteigung

Zur Charakterisierung der Spindel wird oft der Wirkungsgrad herangezogen. In diesem sind die entsprechenden Verlustleistungen aufgrund auftretender Rollreibung enthalten.

Riementriebe

Die Riementriebe haben die Aufgabe, ein Moment von einer rotatorischen Achse auf eine andere zu übertragen. Dadurch kann auch ein entsprechendes Übersetzungsverhältnis realisiert werden. Abbildung 6-5 veranschaulicht schematisch die Funktionsweise eines Riementriebs.

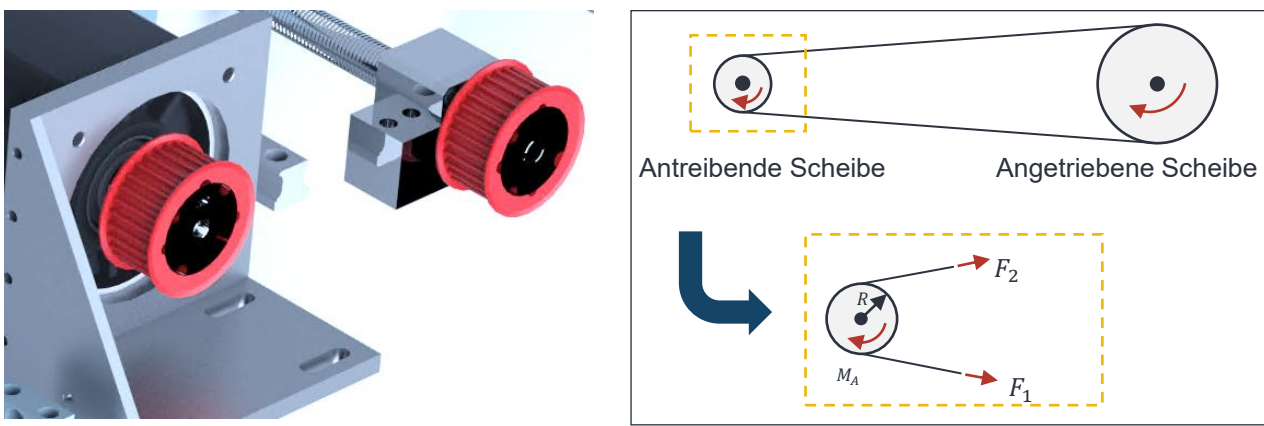


Abbildung 6-5: Schematische Darstellung eines Riementriebs

Nach (Haberhauer 2018) kann der in den Gleichungen 6-24 und 6-25 beschriebene Zusammenhang abgeleitet werden. Die Beschreibung des Riemens kann analog zu den dargestellten Zusammenhängen der Materialbahnen erfolgen. In den betrachteten Produktionsmaschinen sind ausschließlich Zahnriemen verbaut. Diese bieten den Vorteil der Schlupffreiheit. Dadurch ist sichergestellt, dass die entsprechenden Bewegungen definiert ablaufen und eine präzise Steuerung der Maschine erst ermöglicht wird.

$$F_t = \frac{M_A}{R} \quad 6-24$$

$$F_{1,2} = F_v \pm \frac{F_t}{2} \quad 6-25$$

mit

F_t = Tangentialkraft

F_v = Vorspannkraft

6.1.3 Elektromechanische Komponenten

Zu den elektromechanischen Komponenten werden im Wesentlichen sämtliche in den Anlagen verbauten Antriebe zugeordnet. Bei den verbauten Antrieben handelt es sich vorwiegend um Servomotoren. An dieser Stelle bietet es sich an, die vordefinierten Modellbausteine zu verwenden. Abbildung 6-6 veranschaulicht die qualitative Funktionsweise der Modellbausteine. Eingangsgrößen sind hierbei die Soll-Drehzahl n_{soll} und die Ist-Drehzahl n_{ist} . Ein Ausgangsparameter ist das Antriebsdrehmoment, welches auf die entsprechenden gekoppelten Komponenten wirkt.

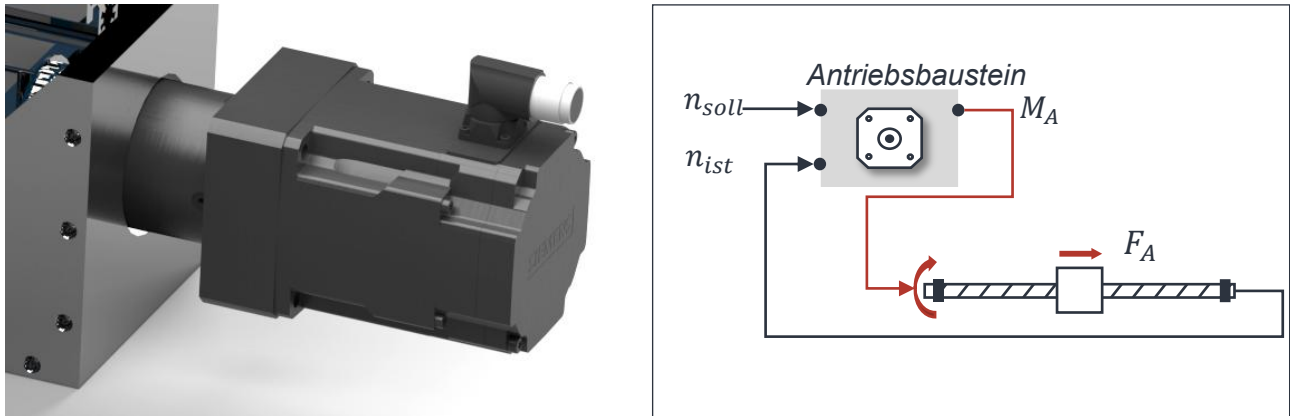


Abbildung 6-6: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Antriebsbausteine

Im Antriebsbaustein sind Mechanismen zur Regelung der Soll-Drehzahl, ähnlich wie bei realen Antrieben, integriert. An dieser Stelle wird jedoch nicht näher darauf eingegangen. Weitere Einzelheiten können der Hilfefunktion des Simulationstools *Simcenter Amesim* entnommen werden (Siemens PLM Software 2023).

6.1.4 Pneumatische Komponenten

Zu den pneumatischen Komponenten zählen in erster Linie die Pneumatikzylinder, welche bspw. zur Steuerung des Tänzerhaltens verwendet werden. Die Abbildung 6-7 veranschaulicht den schematischen Aufbau eines Zylinders. Die folgenden Erläuterungen sollen eine Übersicht der wichtigsten Zusammenhänge in einem pneumatischen System geben, welches in entsprechenden Modellbausteinen angewandt wird. Die detaillierten Beschreibungen der entsprechenden Massenflüsse in Abhängigkeit von Ventilstellungen und Drücken sind in (Ilchmann et al. 2006) dargestellt.

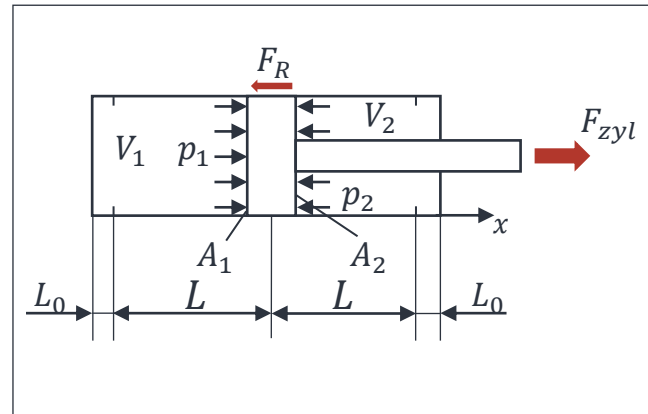


Abbildung 6-7: Vereinfachte Darstellung eines Pneumatikzylinders (in Anlehnung an (Ilchmann et al. 2006))

Der Zylinder besteht aus zwei Kammern. Abhängig von den Drücken p_1 und p_2 und den Flächen A_1 und A_2 stellt sich ein Kräftegleichgewicht ein. Die Zylinderstange ist an äußere Komponenten der Maschine gekoppelt. Durch den Zylinderdruck kann demnach eine äußere Kraft F_{zyl} eingestellt werden. Die grundlegenden Zusammenhänge werden in den Gleichungen 6-26 und 6-27 dargestellt.

$$F_{zyl} = A_1 * p_1 - A_2 * P_2 - F_R \quad 6-26$$

$$F_R = \dot{x} * \mu_{visc} \quad 6-27$$

mit

F_R = Reibkraft

$\mu_{visc, Luft}$ = Viskoser Reibkoeffizient von Luft

Die Drücke in den Zylinderkammern werden nach (Ilchmann et al. 2006) wie folgt in der Gleichung 6-28 beschrieben.

$$\dot{p}_{1,2} = \frac{\kappa}{A_{1,2} * (L_0 + L + x)} * (R_{Gas} T * \dot{m}_{1,2} - p_{1,2} * A_{1,2} \dot{x}) \quad 6-28$$

mit

κ = Isentropenexponent

R_{Gas} = Allgemeine Gaskonstante

$\dot{m}$ = Massenstrom

6.1.5 Elektrische Informationskomponenten

Die Kategorie der elektrischen Informationskomponenten umfasst hauptsächlich sämtliche Sensorsignale. Bei der Modellierung ist vorgesehen, diese Signale an den entsprechenden Stellen abzufangen, zu replizieren und in den Verarbeitungsprozess des Modells zu integrieren. Ein Beispiel hierfür sind die Signale von Messwalzen oder Wegaufnehmern, die zur Regelung und Steuerung der Tänzersysteme dienen. Im Rahmen der Modellformalisierung erfolgt hierdurch die Nachbildung der generellen Steuerungslogik.

6.2 Struktureller Modellaufbau

Die dargestellten Teilmodelle der Einzelkomponenten werden in der Simulationsumgebung *Simcenter Amesim* abgebildet und miteinander gekoppelt. Das Ergebnis ist der strukturelle Aufbau der Modelle des flexiblen Vereinzelungsmoduls und der Z-Falt-Stapelmaschine. Im Folgenden wird der jeweilige strukturelle Aufbau dargestellt und auf Besonderheiten der beiden Modelle eingegangen.

6.2.1 Struktureller Modellaufbau des flexiblen Vereinzelungsmoduls

Die Entwicklung des Modells des flexiblen Vereinzelungsmoduls wurde in (A_Maibaum 2022) durchgeführt. Der strukturelle Modellaufbau wird auszugsweise in der Abbildung 6-8 dargestellt.

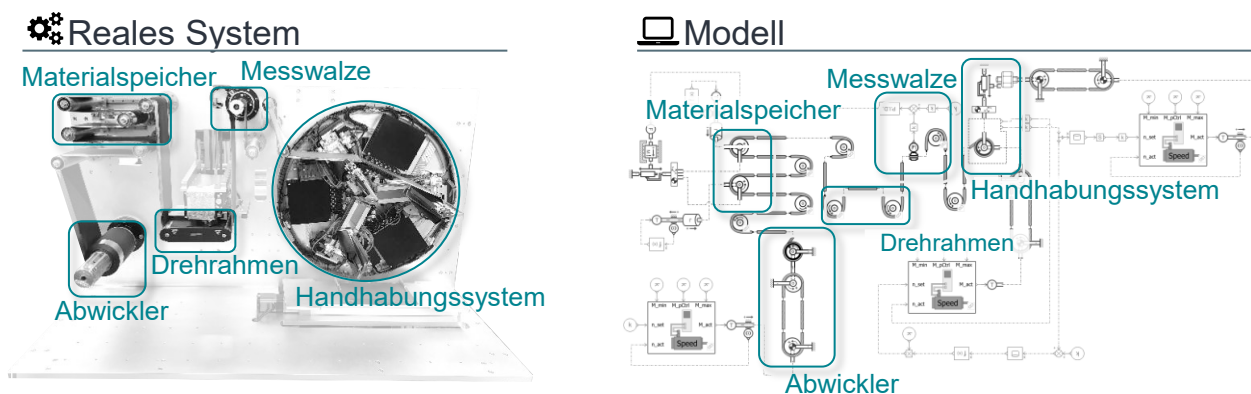


Abbildung 6-8: Struktureller Modellaufbau des flexiblen Vereinzelungsmoduls – links: reales System (in Anlehnung an (Weinmann 2022)), rechts: Auszug Simulationsmodell (in Anlehnung an (A_Maibaum 2022))

Auf der linken Seite der Abbildung ist das reale System und auf der rechten Seite das entsprechende Modell in dem Tool *Simcenter Amesim* dargestellt. Weiterhin sind die übergeordneten Baugruppen gekennzeichnet. Die Funktionsweise der Maschine ist

insbesondere durch die Formatflexibilität der zu vereinzelnenden Elektrodenblätter geprägt. Abhängig von der zu vereinzelnenden Elektrodenblattlänge L_{Sheet} und der Bahn- respektive Ablegegeschwindigkeit v_{Bahn} werden die abzufahrenden digitalen Kurvenscheiben der Antriebe in der realen Steuerung im Rüstvorgang neu berechnet. Der Rüstvorgang wird ebenfalls in der Modellierung berücksichtigt. Abbildung 6-9 veranschaulicht die generelle Funktionsweise des Modells.

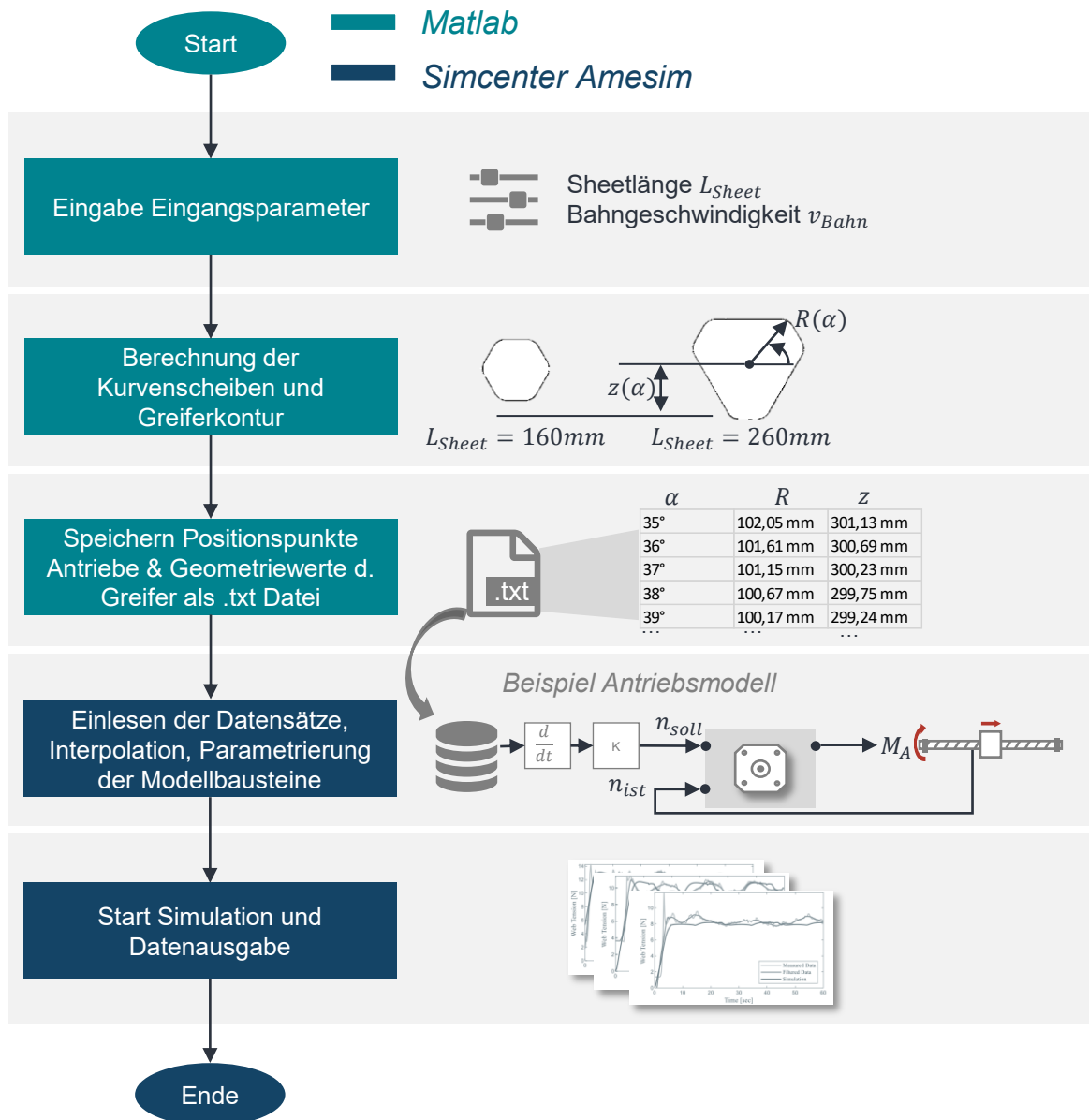


Abbildung 6-9: Funktionsweise des Modells des flexiblen Vereinzelungsmoduls

Für die Nutzung des Modells und insbesondere der Kurvenscheibenberechnung wird das Softwaretool *Matlab* verwendet. Hier erfolgt zunächst die Eingabe der Eingangsparameter des Modells. Abbildung 6-10 veranschaulicht die Eingangsparameter und aus-

zugsweise die internen Parameter und Ausgangsparameter des Modells. Die Eingangsparameter umfassen die an der realen Anlage einstellbaren Maschinenparameter und die für die Simulation notwendigen materialspezifischen Parameter. Die internen Parameter umfassen im Wesentlichen die Parameter, welche die einzelnen Komponenten der Maschine beschreiben. Zu den Ausgangsparametern zählt insbesondere die beschriebene Zielgröße, der Bahnzug der Elektrodenbahn. Dennoch lassen sich diverse weitere Ausgangsgrößen ableiten, welche das Maschinenverhalten beschreiben. Hierzu gehören beispielsweise die Drehzahlen der Antriebe und Zylinderpositionen.

Eingangsparameter	Interne Parameter	Ausgangsparameter
Maschinenparameter <i>Elektrodenblattlänge [mm]</i> <i>Soll-Bahnzug [N]</i> <i>Soll-Bahngeschwindigkeit [mm/s]</i>	<i>Reibkoeff. Lager-Rollen [-]</i> <i>Trägheitsmomente [kgm²]</i> <i>Exzentrizität Rollen [μm]</i> <i>Bauteilmassen [kg]</i> <i>Bauteilpositionen [mm]</i> <i>Bauteilgeometrien [mm]</i> <i>Wirkungsgrad Spindeln [-]</i> <i>Reibkoeff. Linearführungen [-]</i> ...	Zielgröße <i>Bahnzug der Elektrodenbahn an sämtlichen Positionen [N]</i>
Materialspezifische Parameter <i>E-Modul Elektrode [GPa]</i> <i>Längengewicht [g/m]</i> <i>Elektrodenstärke [μm]</i> <i>Bahnquerschnitt [mm²]</i> <i>Elektrodenstärke [g/mm³]</i> <i>Reibkoeff. Elektrode-Rollen [-]</i> <i>Start-Coildurchmesser [mm]</i>		Weitere ableitbare Parameter <i>Sämtliche Parameter, welche das Maschinenverhalten beschreiben:</i> <i>Zylinderpositionen [mm]</i> <i>Drehzahlen der Antriebe [1/s]</i> ...

Abbildung 6-10: Parameterauszug – flexibles Vereinzelungsmodul

Die Elektrodenblattlänge L_{Sheet} wird verwendet, um die Greiferkontur zu bestimmen. Beschrieben wird die Kontur durch die Abstandsfunktion $R(\alpha)$ (vgl. Abbildung 6-9). Die Kurvenscheiben, welche in der Steuerung der Maschine hinterlegt sind, werden anhand L_{Sheet} und der Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} ermittelt. Durch die Kurvenscheiben wird gewährleistet, dass das vereinzelte Elektrodenblatt in einer konstant bleibenden Höhe, mit einer konstant bleibenden Tangentialgeschwindigkeit abgelegt wird. So muss insbesondere die geometrische Kontur der Greifer in einer vertikalen Bewegung des Handhabungssystems ausgeglichen werden. Die genaue Berechnungsvorschrift wird in (Schmidgruber 2020) dargestellt und im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Abbildung 6-11 veranschaulicht die ausgeführten Bewegungen des Handhabungssystems in Abhängigkeit von unterschiedlichen zu fertigenden Elektrodenblattlängen bei einer konstant bleibenden Ablege- bzw. Bahngeschwindigkeit. Auf der linken Seite wird die vertikale Position des Handhabungssystems dargestellt, auf der rechten Seite dessen

Drehzahl. Es ist erkennbar, dass bei einer höheren eingestellten Elektrodenblattlänge die durchgeführte vertikale Ausgleichsbewegung größer ist. Es kommt hierbei ebenfalls zu erhöhten Schwankungen der Drehzahl des Handhabungssystems. Hierdurch wird eine konstante Tangentialgeschwindigkeit im Ablegepunkt erreicht.

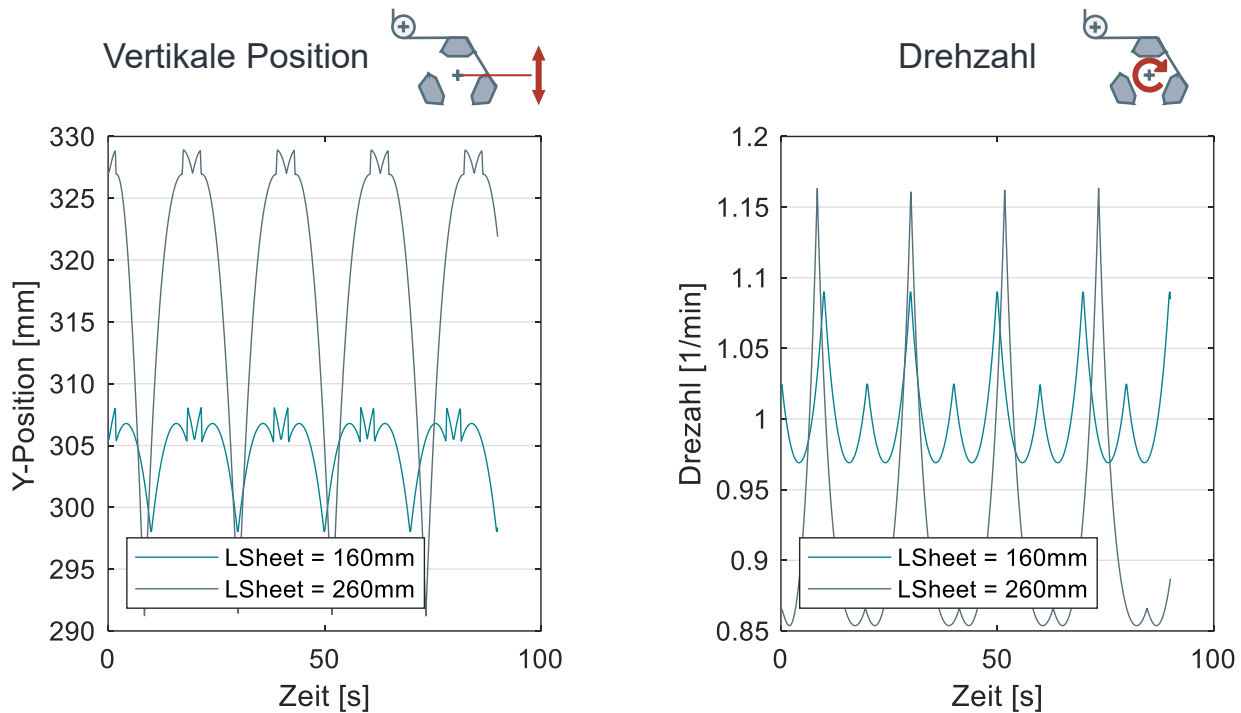


Abbildung 6-11: Kurvenscheiben in Abhängigkeit von der gewählten Elektrodenblattlänge bei einer Bahngeschwindigkeit von 12 mm/s (in Anlehnung an (Schmidgruber 2020))

Im Anschluss an die Berechnungen werden die generierten Kontur- und Positionsdatenpunkte in einer Textdatei gespeichert.

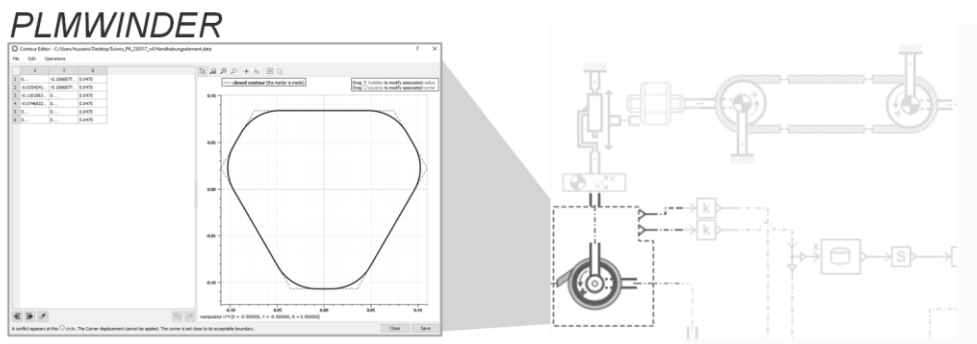


Abbildung 6-12: Auszug Modellbaustein „PLMWINDER“

Das in *Simcenter Amesim* formalisierte Modell greift auf diese Textdateien zu. Aus den Positionsdaten werden Soll-Drehzahlen durch eine zeitliche Ableitung generiert und als

Eingangswerte an die entsprechenden Antriebsmodelle gegeben. Um das Handhabungssystem in dem Modell abzubilden, wird auf den Modellbaustein eines Wicklers (*PLMWINDER*) zurückgegriffen (vgl. Abbildung 6-12).

Nachdem die entsprechenden Positions- und Konturdaten eingelesen worden sind, wird die eigentliche Simulation durchgeführt. Durch diese Vorgehensweise wird der Rüstvorgang modellbasiert ermöglicht.

6.2.2 Struktureller Modellaufbau der Z-Falt-Stapelmaschine

Im Folgenden wird auf den strukturellen Modellaufbau der Z-Falt-Stapelmaschine eingegangen. Die Modellentwicklung wird in der Arbeit von (A_Boschert 2023) dargestellt. Abbildung 6-13 veranschaulicht den strukturellen Modellaufbau der Z-Falt-Stapelmaschine.

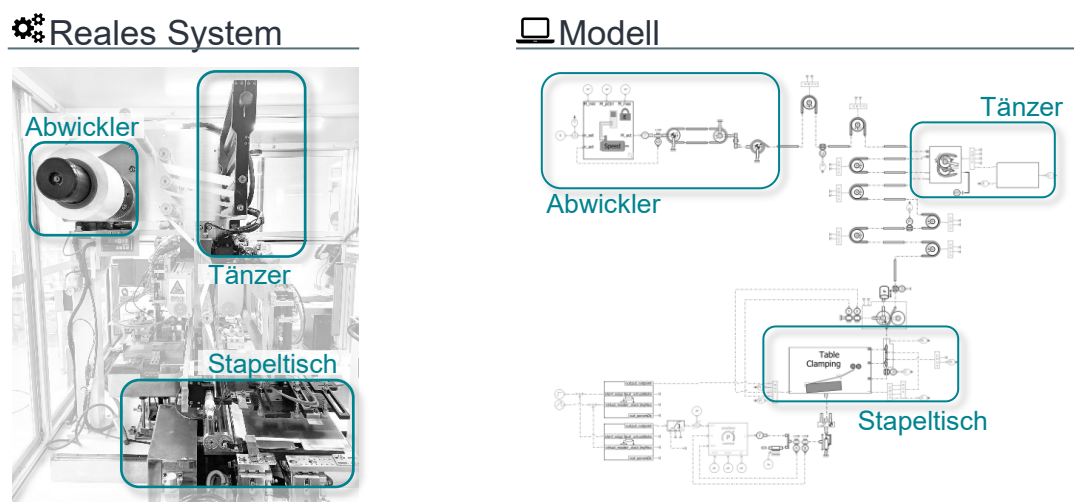


Abbildung 6-13: Struktureller Modellaufbau der Z-Falt-Stapelmaschine – links: reales System, rechts: Auszug Simulationsmodell (in Anlehnung an (A_Boschert 2023))

Auf der linken Seite der Abbildung ist das reale System und auf der rechten Seite der strukturelle Modellaufbau in *Simcenter Amesim* dargestellt. Hierbei wurden insbesondere der Abwickler, das Rollen- und Tänzersystem und der Stapeltisch modelliert. Die Baugruppe zur Materialförderung der Elektrodenblätter wird auf Basis der in Kapitel 5 durchgeführten Bewertung nicht abgebildet. Die maschinenseitigen Einflüsse für diesen Prozess beziehen sich in erster Linie auf die Bahnverarbeitung des Separators. Analog zu dem Modell des flexiblen Vereinzelungsmoduls werden ebenfalls Eingangsparameter, interne Parameter und Ausgangsparameter definiert. Abbildung 6-14 veranschau-

licht die genannten Parameter des Modells der Z-Falt-Stapelmaschine. Bei den Eingangsparametern wird ebenfalls zwischen den maschinen- und materialspezifischen Parametern unterschieden.

Eingangsparameter	Interne Parameter	Ausgangsparameter
Maschinenparameter <i>Mittlere Tischgeschw. [mm/s]</i> <i>Zylinderdruck Tänzer [MPa]</i>	<i>Reibkoeff. Lager-Rollen [-]</i> <i>Trägheitsmomente [kgm²]</i> <i>Exzentrizität Rollen [μm]</i> <i>Bauteilmassen [kg]</i> <i>Bauteilpositionen [mm]</i> <i>Bauteilgeometrien [mm]</i> <i>Wirkungsgrad Spindeln [-]</i> <i>Reibkoeff. Linearführungen [-]</i> ...	Zielgröße <i>Bahnzug der Separatorbahn an sämtlichen Positionen [N]</i>
Materialspezifische Parameter <i>E-Modul Separator [GPa]</i> <i>Längengewicht [g/m]</i> <i>Separatorstärke [μm]</i> <i>Bahnquerschnitt [mm²]</i> <i>Separatorstärke [g/mm³]</i> <i>Reibkoeff. Separator-Rollen [-]</i> <i>Coildurchmesser [mm]</i>		Weitere ableitbare Parameter <i>Sämtliche Parameter, welche das Maschinenverhalten beschreiben:</i> <i>Zylinderpositionen [mm]</i> <i>Drehzahlen der Antriebe [1/s]</i> ...

Abbildung 6-14: Parameterauszug – Z-Falt-Stapelmaschine

Die Hauptparameter der Maschine, welche ein Bediener einstellen kann, belaufen sich in erster Linie auf die mittlere Tischgeschwindigkeit und den Zylinderdruck, welcher sich auf das Verhalten des Tänzersystems niederschlägt. Die Tischgeschwindigkeit selbst folgt einem digitalen Kurvenscheibenprofil. Die mittlere Tischgeschwindigkeit ist definiert als die konstante Geschwindigkeit, mit der die Achse dieselbe Wegstrecke in derselben Zeit wie mit dem vorgegebenen Kurvenscheibenprofil zurücklegen würde.

Die materialspezifischen, internen Parameter und Ausgangsparameter sind im Wesentlichen analog zu den Modellparametern des flexiblen Vereinzelungsmoduls. Die Parameter beziehen sich jedoch statt auf Elektrodenbahnen auf das zu verarbeitende Separatormaterial. Da das Verhalten des Tisches in besonderem Maße die Funktionsweise der Maschine charakterisiert, wird dieses in den folgenden Ausarbeitungen näher beleuchtet. Abbildung 6-15 veranschaulicht die Steuerungslogik des Tisches und den dazugehörigen Zusammenhang zwischen der mittleren Tischgeschwindigkeit und der Zykluszeit. Diese Logik ist ebenfalls so in dem Modell implementiert. Es ist zu erkennen, dass es sich um keinen linearen Zusammenhang zwischen mittlerer Tischgeschwindigkeit und der Zykluszeit handelt. Dies ist damit zu begründen, dass der Tisch beim Ablegen der Elektrodenblätter eine bestimmte Zeit stillsteht.

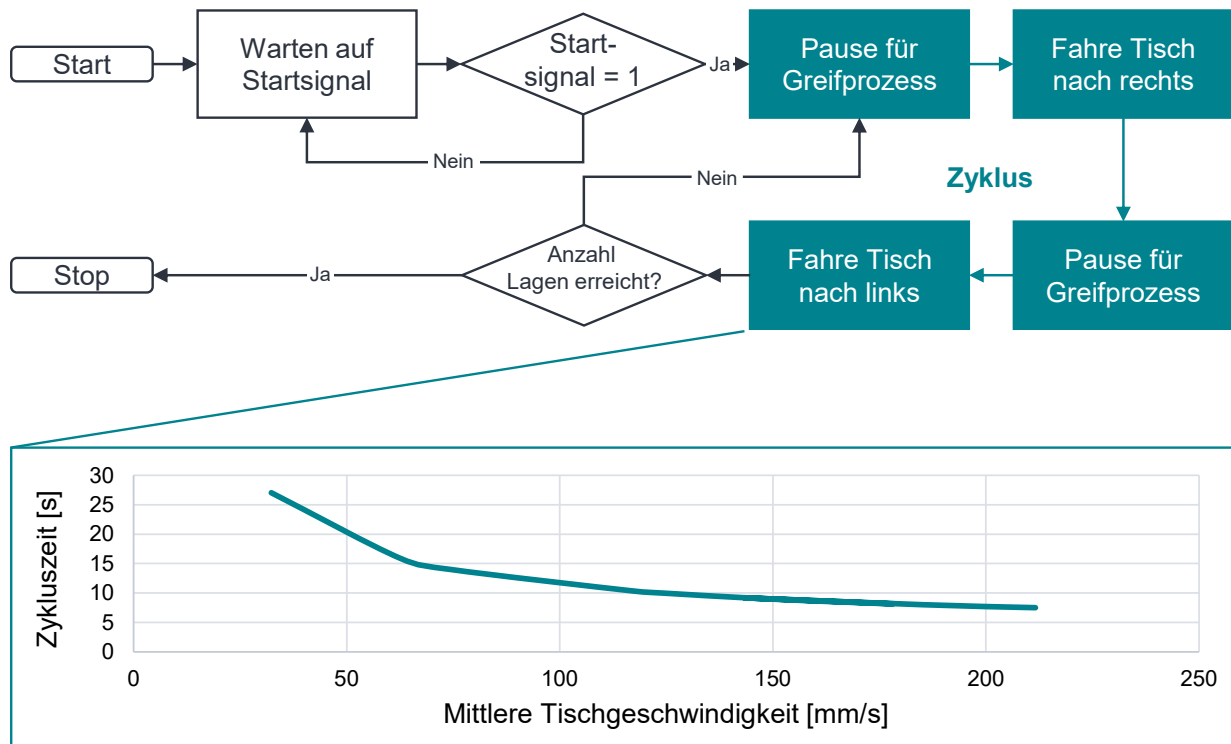


Abbildung 6-15: Zusammenhang der Steuerungslogik, Zykluszeit und mittleren Tischgeschwindigkeit (in Anlehnung an (A_Boschert 2023))

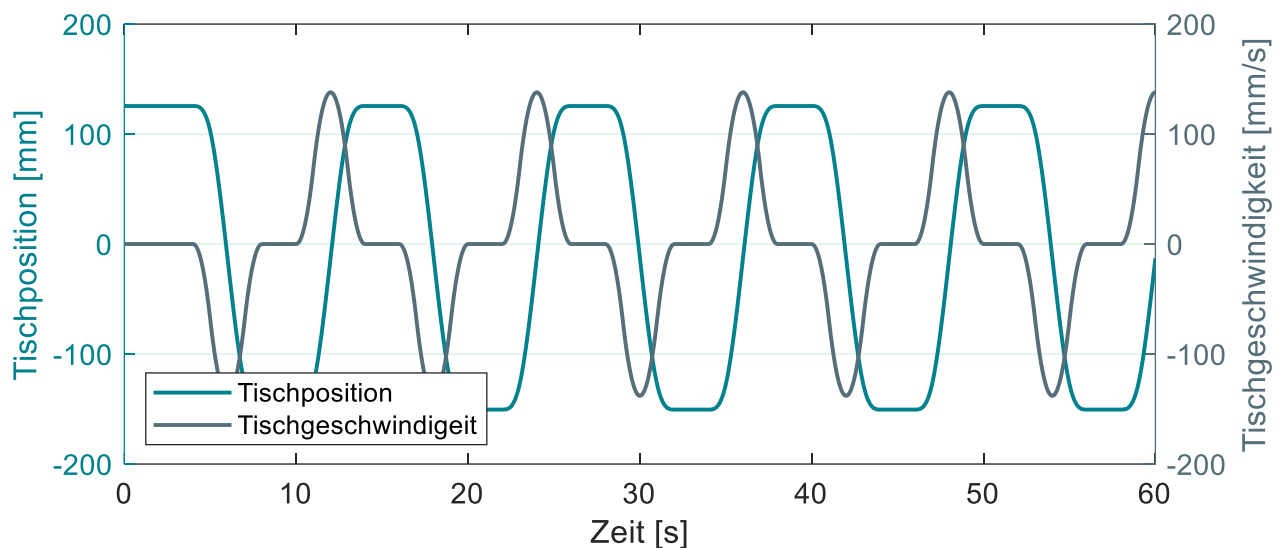


Abbildung 6-16: Position und Geschwindigkeit des Stapeltisches

Abbildung 6-16 zeigt beispielhaft die qualitativ nachgebildete horizontale Position des Stapeltisches und seine Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit bei einer gewählten mittleren Tischgeschwindigkeit von 100 mm/s. In den Zeitabschnitten, in denen die Geschwindigkeit gleich null ist, findet das Ablegen der Elektrodenblätter auf dem Sta-

peltisch statt. Das Bewegungsprofil wird mittels des Modellbausteins *THIRDORDER-PROFILE* erstellt. Hierdurch wird das Bewegungsprofil in der realen Maschine approximiert.

6.3 Zusammenfassung: Modellformalisierung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde die grundlegende Vorgehensweise bei dem Modell-
aufbau respektive der Modellformalisierung dargestellt. Die einzelnen Komponenten
werden mithilfe physikalischer Gleichungssysteme modelliert und im Kontext einer mul-
tiphysikalischen Systemsimulation zusammengeführt. Die entsprechende Parametrie-
rung der Teilmodelle erfolgt im Anschluss auf Grundlage der festgelegten Detaillie-
rungsgrade. Insbesondere zeichnen sich diese Detaillierungsgrade durch die Berück-
sichtigung von Faktoren wie Reibungskoeffizienten, Rundlaufgenauigkeiten und rege-
lungstechnischen Aspekten aus. Des Weiteren wurden der strukturelle Aufbau und die
Funktionsweise der Modelle für das flexible Vereinzelungsmodul und die Z-Falt-Stapel-
maschine detailliert dargelegt.

7 Modellparametrierung

In den folgenden Ausarbeitungen werden die Methodik und Vorgehensweise zur Ermittlung entsprechender Parameterkennwerte erläutert. Die zu ermittelnden Kennwerte ergeben sich aus den zuvor definierten Detaillierungsgraden. Die Abbildung 7-1 veranschaulicht die hier generell gewählte Vorgehensweise.

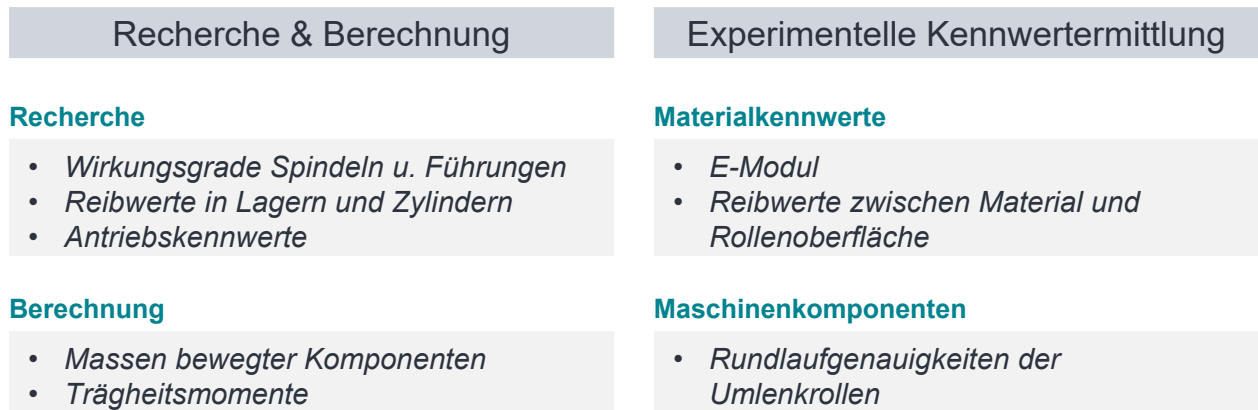


Abbildung 7-1: Vorgehensweise zur Modellparametrierung

Durch die Analyse von Datenblättern der verbauten Komponenten werden relevante Kennwerte wie die Wirkungsgrade von Spindeln und Antriebskennwerte ermittelt. Zusätzlich werden Massen der bewegten Komponenten sowie Trägheiten mithilfe entsprechender Berechnungsvorschriften und der Ableitung dieser Kennwerte aus den CAD-Dateien der Maschinen bestimmt. Weiterhin werden Kennwerte, die sich nicht direkt mittels Recherche oder Berechnung ermitteln lassen, durch eine experimentelle Vorgehensweise bestimmt. Im Fokus steht dabei insbesondere die Ermittlung materialspezifischer Kennwerte von Elektroden und Separatoren. Diese sind sowohl für die Anwendung der Berechnungsvorschriften für die Materialbahnen als auch als Schnittstelle für die Teilmodelle der Umlenkrollen erforderlich. Eine weitere experimentelle Charakterisierung wird an den Umlenkrollen im Hinblick auf die Rundlaufgenauigkeit durchgeführt.

7.1 Recherche und Berechnung

Zunächst wird mithilfe einer umfassenden Recherchetätigkeit ein breites Spektrum der Parameterkennwerte ermittelt. Für die verbauten Servomotoren werden die entsprechenden Datenblätter hinzugezogen. Hier können Nenndrehzahlen, -momente, minimale und maximale Drehmomente und Trägheitswerte identifiziert werden. Anhand von Literaturwerten erfolgt die Abschätzung der Reibungsverhältnisse in den Wälzlagern

und den pneumatischen Zylindern. Weiterhin lassen sich Dichtewerte der verbauten Materialien ableiten, um darauf aufbauend entsprechende Massen und Trägheitsmomente berechnen zu können. Tabelle 7-1 veranschaulicht einen Auszug der recherchierten Reibwerte und Wirkungsgrade. Diese werden für die entsprechenden Teilmodelle verwendet.

Tabelle 7-1: Auszug recherchierter Reibwerte und Wirkungsgrade

Parameter	Kennwert	Referenz
Lagerreibwert $\mu_{R,L}$ [-]	0,0015	(Jacobs 2014)
Wirkungsgrad Linearführung η_{LF} [-]	0,9	(Schmalzhaf et al. 2013)
Wirkungsgrad Spindel η_S [-]	0,9	(Schmalzhaf et al. 2013)
$\mu_{visc,Luft}$ [Ns/m]	44,76	(Moucka 2012)

Die Bauteilmassen und Trägheitsmomente werden sowohl berechnet als auch aus den CAD-Daten extrahiert. Das Massenträgheitsmoment für die Umlenkrollen wird berechnet. Abbildung 7-2 zeigt eine vereinfachte Schnittansicht einer Umlenkrolle. Für die Bestimmung des Massenträgheitsmoments werden die bewegten Komponenten der Umlenkrolle betrachtet. Diese belaufen sich auf den Mantel, die Kugeln und den äußeren Ring der Lager.

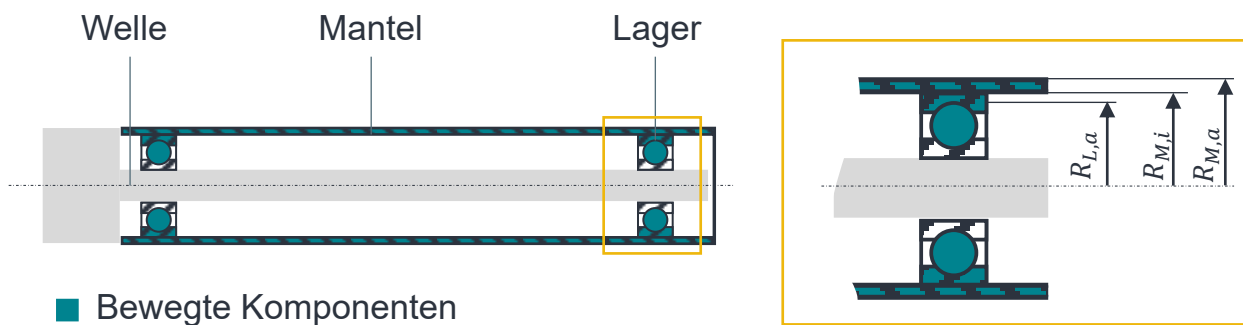


Abbildung 7-2: Vereinfachte Schnittansicht einer Umlenkrolle

Die Summe des Gesamtmassenträgheitsmoments einer Umlenkrolle J_R lässt sich durch die Summe der Massenträgheitsmomente des Mantels J_{Mantel} und der Lager J_{Lager} bestimmen. Die Berechnungsvorschriften sind in den Gleichungen 7-1 bis 7-3 dargestellt. Mithilfe dieser Zusammenhänge werden die Massenträgheitsmomente der unterschiedlichen Umlenkrollen der betrachteten Maschinen ermittelt.

$$J_R = J_{Mantel} + 2 * J_{Lager} \quad 7-1$$

$$J_{Mantel} = \frac{1}{2} m_{Mantel} * (R_{M,i}^2 + R_{M,a}^2) \quad 7-2$$

$$J_{Lager} = R_{L,a}^2 * (m_{Au\beta enring} + N_{Kugeln} * m_{Kugel} * \frac{7}{20}) \quad 7-3$$

mit

m_{Mantel} = Masse des Mantels

$m_{Au\beta enring}$ = Masse des Lager-Au\beta enrings

m_{Kugel} = Masse einer Kugel in einem Lager

N_{Kugeln} = Anzahl der Kugeln in einem Lager

$R_{M,i}$ = Innerer Mantelradius

$R_{M,a}$ = \u00c4u\beta erer Mantelradius

$R_{L,a}$ = Mittlerer Radius des Lager-Au\beta enrings

7.2 Experimentelle Kennwertermittlung

Zur Parametrierung der Teilmodelle ist eine experimentelle Erfassung bestimmter Kennwerte notwendig. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der f\u00fcr die Modellierung notwendigen Materialkennwerte sowie der Rundlaufgenauigkeiten der Umlenkrollen dargestellt.

7.2.1 Materialkennwerte

Die zu ermittelnden Materialeigenschaften betreffen den Elastizit\u00e4tsmodul von Elektroden und Separatoren sowie die Bestimmung der spezifischen Reibwerte zwischen den Materialoberfl\u00e4chen und den Oberfl\u00e4chen der ber\u00fchrenden Umlenkrollen in den Systemen. Im Folgenden werden die angewandten Charakterisierungsmethoden vorgestellt. Die erzielten Ergebnisse werden detailliert f\u00fcr verschiedene Elektroden und Separatoren beschrieben und diskutiert. Als Grundlage zur Bestimmung der Elastizit\u00e4tsmodule dient ein einachsiger Zugversuch gem\u00e4\u00df (DIN EN ISO 527 2019). Die Reibwertermittlung orientiert sich an (DIN EN ISO 8295 2004).

7.2.1.1 Kennwertermittlung Elektroden

F\u00fcr die nachfolgenden Ausarbeitungen werden verschiedene Elektroden-Materialsysteme untersucht. Au\beta erdem erfolgt ein Kalandrieren der Elektroden mit unterschiedlichen Verdichtungsgraden. Dies dient dazu, einen umfassenden \u00dcberblick \u00fcber den Einfluss verschiedener Materialien auf die Parameter der Teilmodelle zu schaffen. F\u00fcr

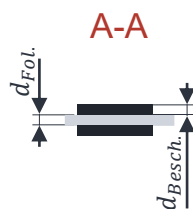
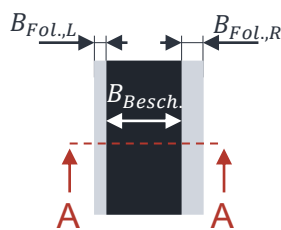
die Analysen wurden eine Graphit-Anode, eine LFP-Kathode und eine NMC622-Kathode herangezogen.

Kalandrieren ausgewählter Materialsysteme

Tabelle 7-2 veranschaulicht die geometrischen Eigenschaften der unkalandrierten Elektroden.

Tabelle 7-2: Eigenschaften der unkalandrierten Elektroden

Material	$B_{Fol,L}$ [mm]	$B_{Fol,R}$ [mm]	$B_{Besch.}$ [mm]	$d_{Fol.}$ [μm]	$d_{Besch.}$ [μm]
Anode – Graphit	10	45	148	8	142,5
Kathode – LFP	10	45	144	15	116,5
Kathode – NMC 622	10	45	144	15	92



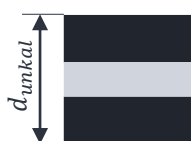
$B_{Fol,L}$ = Folienbreite links
 $B_{Fol,R}$ = Folienbreite rechts
 $B_{Besch.}$ = Beschichtungsbreite
 $d_{Fol.}$ = Foliendicke
 $d_{Besch.}$ = Beschichtungsdicke

Die Verdichtung der Elektroden erfolgt jeweils in drei Stufen. Diese belaufen sich auf 5 %, 10 % und 15 % in der Dickenreduktion respektive Dichteerhöhung. Tabelle 7-3 veranschaulicht die Eigenschaften der kalandrierten Elektroden.

Tabelle 7-3: Eigenschaften der kalandrierten Elektroden

Material	V_{kal} [%]	d_{unkal} [μm]	$d_{kal,soll}$ [μm]	$d_{kal,mess}$ [μm]
Anode – Graphit	5	293	278,35	278
	10	293	263,7	264
	15	293	249,05	248
Kathode – LFP	5	248	235,6	235
	10	248	223,2	222
	15	248	210,8	209
Kathode – NMC 622	5	199	189,05	188
	10	199	179,1	180
	15	199	169,15	169

unkalandriert



kalandriert



V_{kal} = Kalandriergrad
 d_{unkal} = unkalandrierte Dicke
 $d_{kal,soll}$ = kalandrierte Dicke (Soll)
 $d_{kal,mess}$ = kalandrierte Dicke (gemessen)

Die Berechnungsvorschriften für die unkalandrierte Dicke und die Soll-Dicke nach dem Kalandrierprozess sind in den Gleichungen 7-4 und 7-5 dargestellt.

$$d_{unkal} = d_{Fol.} + 2 * d_{Besch.} \quad 7-4$$

$$d_{kal,soll} = (1 - V_{kal}) * d_{unkal} \quad 7-5$$

Für den Verdichtungsprozess wird ein Kalandrier (Bez. *GKL 5400 MS*) der Firma *SAUERESSIG* verwendet. Anhand der Soll-Dicke nach dem Kalandrieren $d_{kal,soll}$ wird der Kalandrierspalt an der Anlage über die Position der Hydraulikzylinder eingestellt. Das Kalandrieren erfolgt mit einer Bahngeschwindigkeit von 10 m/min und einem eingestellten Bahnzug von 50 N an dem Ab- und Aufwickler des Kalandriers. Die Dicke $d_{kal,mess}$ beschreibt die tatsächliche gemessene Dicke der Elektrode nach dem Kalandrierprozess. Eine wesentliche Kenngröße des Kalandrierprozesses stellt die auftretende Linienlast dar. Diese wird während der Verarbeitung der Materialien an der Maschine aufgezeichnet. Abbildung 7-3 veranschaulicht die aufgenommene Linienlast bei der Verarbeitung der LFP-Kathode.

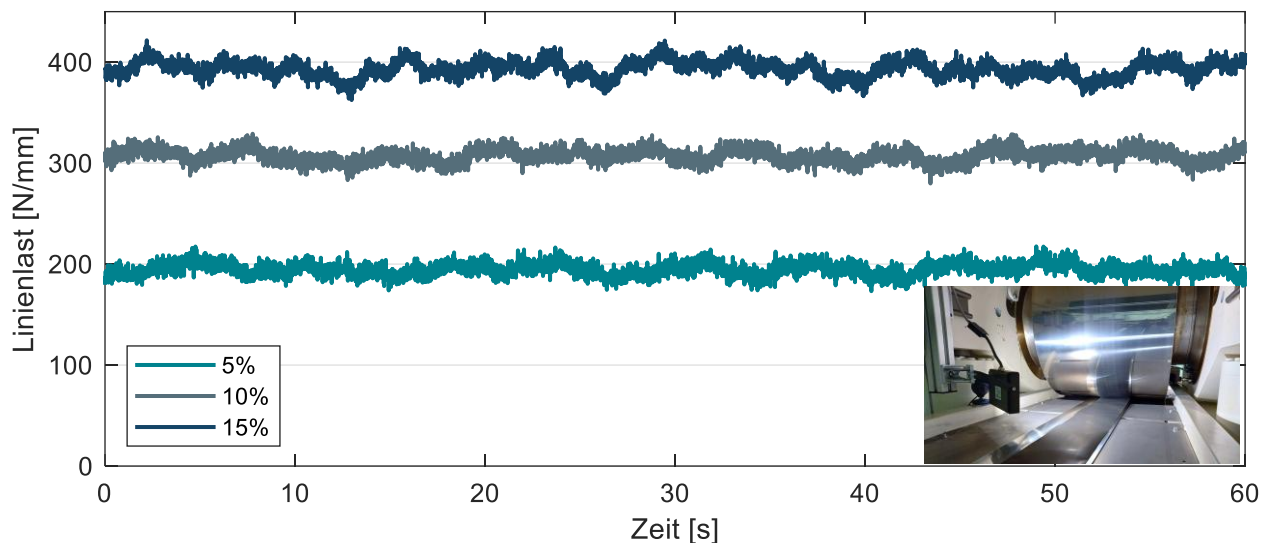


Abbildung 7-3: Aufgenommene Linienlast (LFP-Kathode) bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden

Es ist zu erkennen, dass die Linienlast mit ansteigendem Verdichtungsgrad ebenfalls ansteigt. Inhomogenitäten in der Beschichtungsdicke der unkalandrierten Elektroden und Abweichungen in der Rundlaufgenauigkeit der Kalandrierwalzen führen zu Schwankungen in den Linienlastverläufen. Die Abbildung 7-4 veranschaulicht die aufgetretenen

durchschnittlichen Linienlasten bei den betrachteten Materialien und Verdichtungsgraden. Auch hier ist zu erkennen, dass mit steigendem Verdichtungsgrad die Linienlast ebenfalls ansteigt.

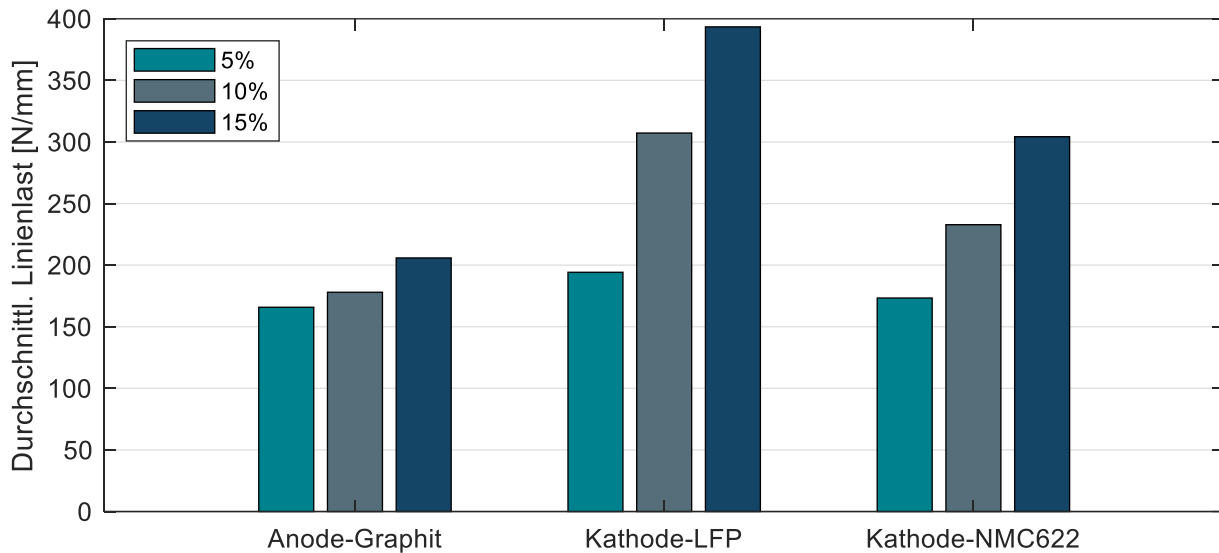


Abbildung 7-4: Durchschnittliche Linienlasten bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden

Es wird weiterhin deutlich, dass die Linienlasten bei der Anode mit steigendem Verdichtungsgrad weniger stark ansteigen als bei den Kathoden. Diese Beobachtung ist zum einen durch das spezifische Materialverhalten der Graphitbeschichtung der Anode und der Lithiummetalloxidbeschichtung der Kathoden zu erklären und zum anderen auf die entsprechende Elektrodendicke vor dem Kalandrieren zurückzuführen.

Zugversuche

Die Materialien werden anschließend gemäß (DIN EN ISO 527 2019) einer Zugprüfung unterzogen. Das primäre Ziel liegt hier in der Ermittlung der E-Module. Weiterhin wird aber auch die Dehngrenze $R_{p0,1}$ als Maß einer zulässigen Belastung der Materialien mitbestimmt. Für jedes Material werden zehn Probenkörper gemäß Norm auf Typ 2 aus dem beschichteten Teil der Elektroden zugeschnitten. Hierbei weisen sie eine Breite von 15 mm und eine Länge von 150 mm auf. Der Schnitt der Proben erfolgt in Maschinenrichtung, da hier während der Materialverarbeitung die wesentliche Zugbeanspruchung auftritt. Der Anfangsabstand zwischen den Klemmen beträgt 100 mm. Sofern eine Probe an der Einspannung respektive den Klemmen reißen sollte, wird diese ver-

worfen. Abbildung 7-5 veranschaulicht den Versuchsaufbau für die Zugprüfung. Verwendet wird die Zugprüfmaschine 2.5kN zwicki RetroLine der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG.

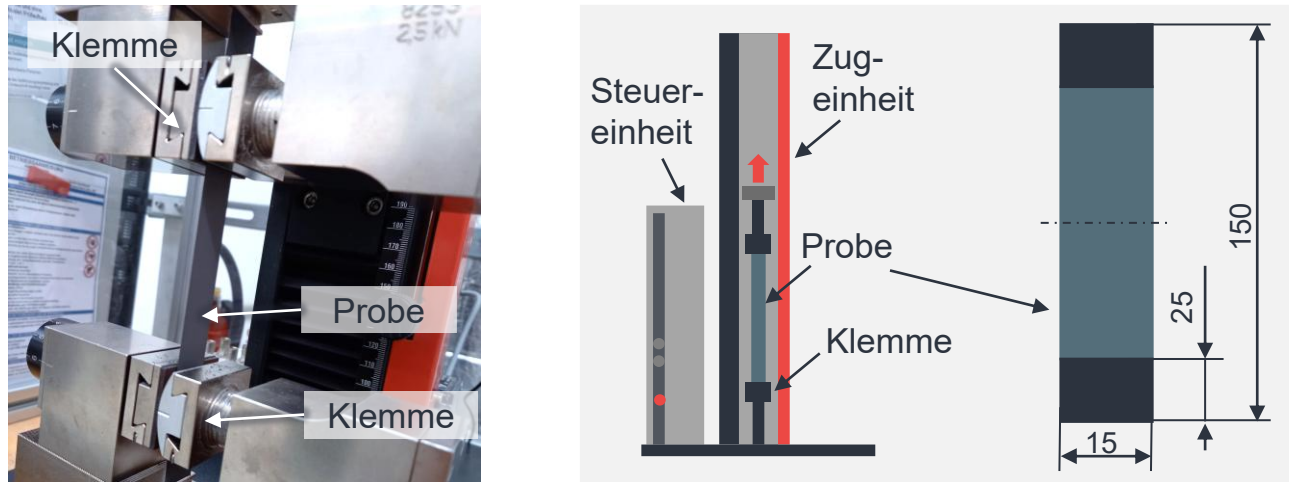


Abbildung 7-5: Versuchsaufbau zur Zugprüfung

Abbildung 7-6 veranschaulicht beispielhaft die ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven der LFP-Kathoden-Proben mit einem Verdichtungsgrad von 10 %. Weiterhin sind die spezifischen Kenngrößen anhand einer Kurve dargestellt.

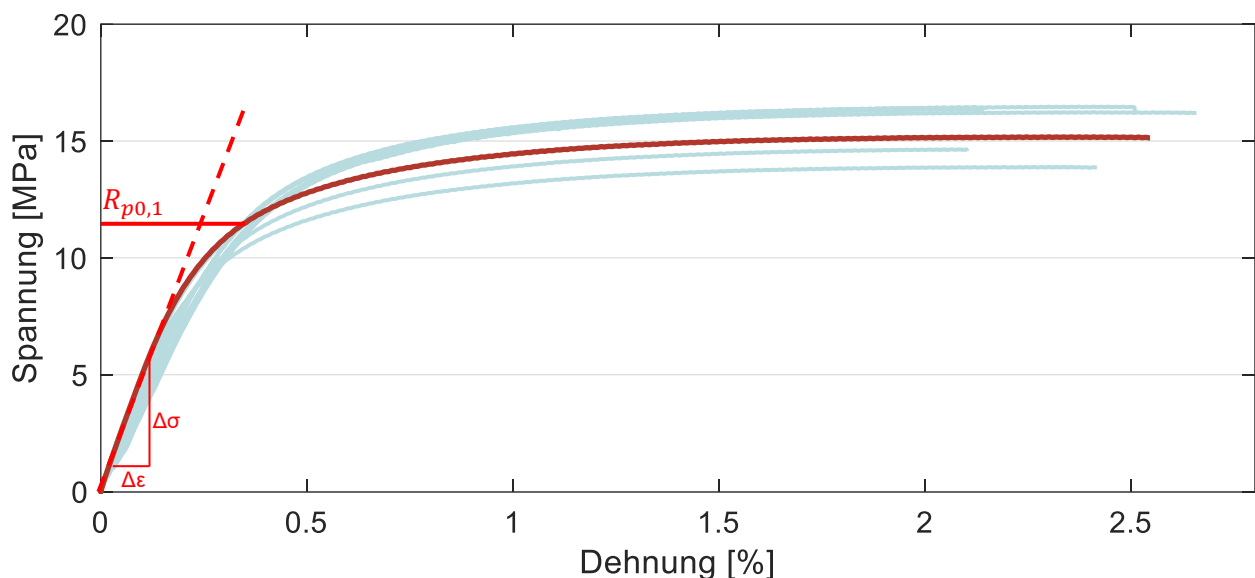


Abbildung 7-6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der LFP-Kathode (10 % Verdichtung)

Der E-Modul beschreibt die Steigung in dem linearen Anfangsbereich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm und die Dehngrenze $R_{p0,1}$ ist die Spannung, bei der die Probe um 0,1 % im plastischen Bereich gedehnt wurde (Bargel 2022). Generell ist eine plastische

Deformation in der Materialverarbeitung zu vermeiden. Da eine genaue Eingrenzung zwischen linearem und plastischem Bereich nicht getätigt werden kann, wird in der Praxis die erläuterte Dehngrenze herangezogen.

Abbildung 7-7 veranschaulicht die ermittelten E-Module der unterschiedlichen Elektrodenmaterialien anhand von Boxplots. Zusätzlich sind auch die Kennwerte der unkalandrierten Materialien dargestellt.

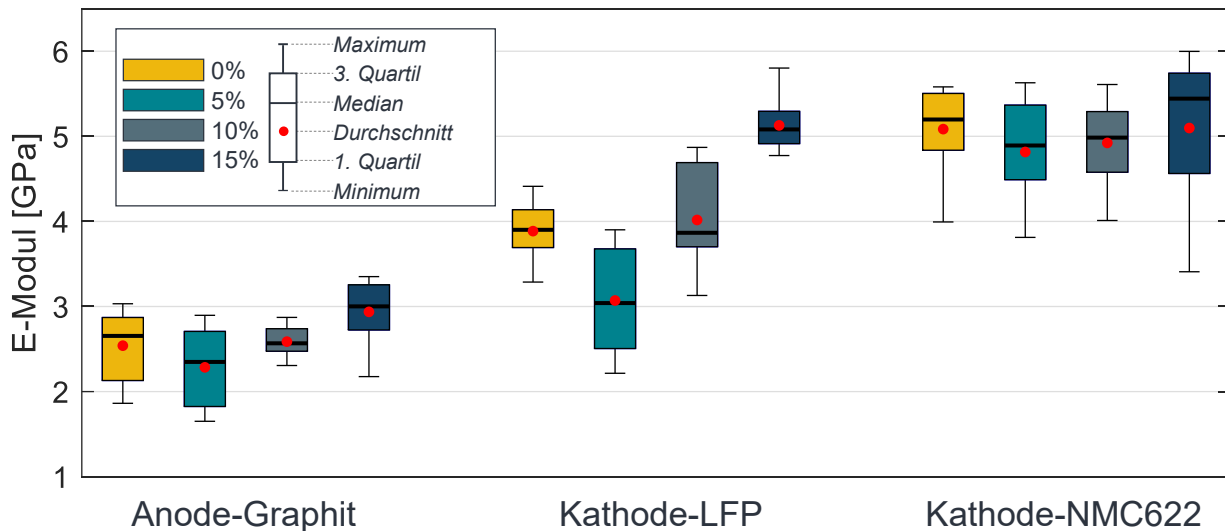


Abbildung 7-7: Ermittelte E-Module der Elektrodenmaterialien

Generell ist zu erkennen, dass sich innerhalb einer Materialgruppe der E-Modul in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad verändert. Abzulesen ist weiterhin, dass die durchschnittlichen E-Module der unkalandrierten Elektroden geringfügig höher ausfallen als bei den Elektroden, welche um 5 %, und bei der NMC622-Kathode, die um 5 % und 10 % verdichtet worden ist. Sobald die Elektroden verdichtet wurden, ist eine Erhöhung des E-Moduls mit zunehmendem Verdichtungsgrad erkennbar. Dies lässt sich unter anderem auf den plastischen Verformungsgrad der Kollektorfolie während des Kalandrierprozesses und die generellen Deformationseffekte auf Partikelebene in der Beschichtung zurückführen. Abbildung 7-8 zeigt die ermittelten Dehngrenzen der unterschiedlichen Materialsysteme. Auffällig hierbei ist, dass die Dehngrenzen der Anoden im Allgemeinen geringer ausfallen als die der Kathodenmaterialien. Die Tabelle 7-4 fasst die ermittelten Durchschnittswerte zusammen.

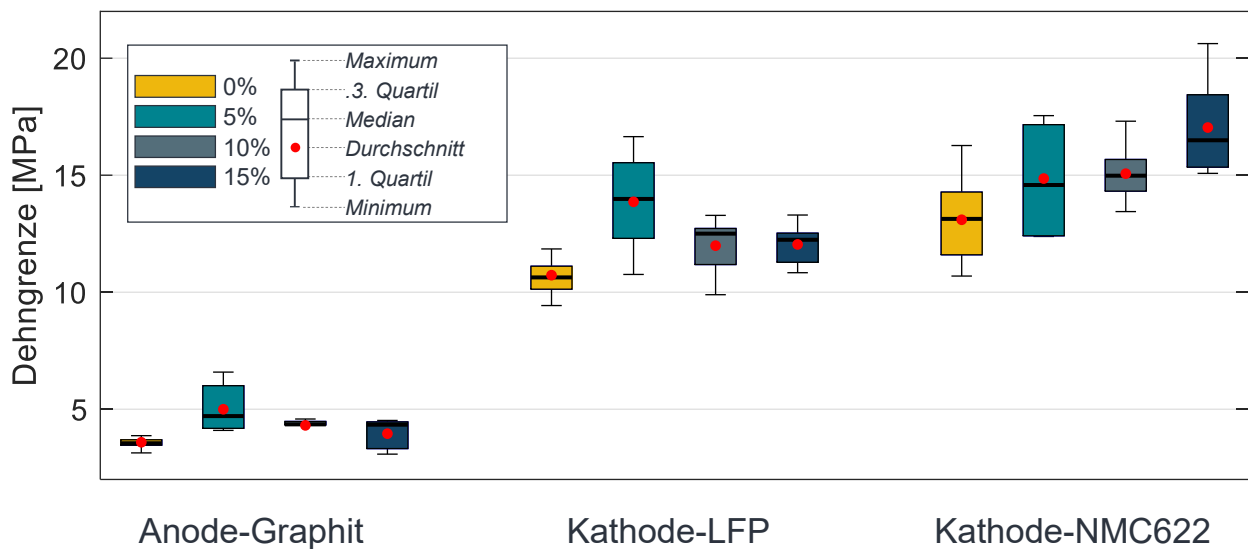


Abbildung 7-8: Ermittelte Dehngrenzen der Elektrodenmaterialien

Tabelle 7-4: Durchschnittliche E-Module und Dehngrenzen der Elektroden

Material	Verdichtungsgrad [%]	E-Modul [GPa]	Dehngrenze [MPa]
Anode	0	2,54	3,589
	5	2,285	4,99
	10	2,587	3,1
	15	2,937	3,957
Kathode-LFP	0	3,886	10,729
	5	3,07	13,864
	10	4,017	11,989
	15	5,128	12,043
Kathode-NMC622	0	5,084	13,096
	5	4,815	14,858
	10	4,923	15,066
	15	5,097	17,038

Reibwertversuche

Neben der Zugprüfung erfolgt eine Ermittlung der Reibungskoeffizienten zwischen Material- und Rollenoberfläche anhand des in Abbildung 7-9 dargestellten Versuchsaufbaus. Die Prüfung wird in Anlehnung an (DIN EN ISO 8295 2004) durchgeführt. Hierbei wird das Prüfmaterial auf einer Grundplatte festgeklemmt. Anschließend wird ein Prüfkörper, der die Oberfläche der Umlenkrollen widerspiegelt, mittels der zuvor beschriebenen Zugprüfmaschine, eines Seils und einer Umlenkung über die Materialoberfläche

der Elektroden gezogen. Während des Vorgangs wird die Zugkraft F_{zug} aufgezeichnet. Der Reibkoeffizient wird schließlich als Koeffizient der aufgebrachten Zugkraft und der Normalkraft der Prüfkörper bestimmt. Die Masse des Prüfkörpers beträgt 0,2 kg. Hierdurch wirkt eine Normalkraft von 1,962 N auf das entsprechende Prüfmaterial. Die Grundfläche des Prüfkörpers ist quadratisch und beträgt 40 cm². Für die Prüfung werden zwei verschiedene Prüfkörper mit unterschiedlichen Oberflächen verwendet. Die Oberfläche des einen Prüfkörpers ist Aluminium, die des anderen ein kohlenstofffaser-verstärkter Kunststoff (CFK). Diese Materialien spiegeln die Oberflächen der verbauten Umlenkrollen in den betrachteten Maschinen wider.

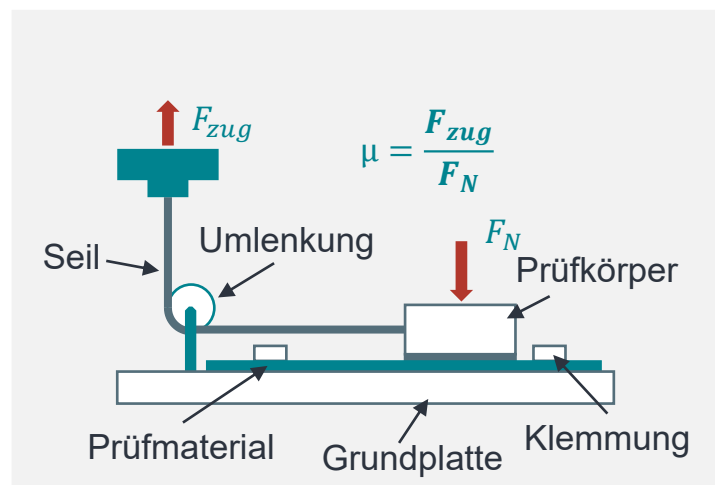
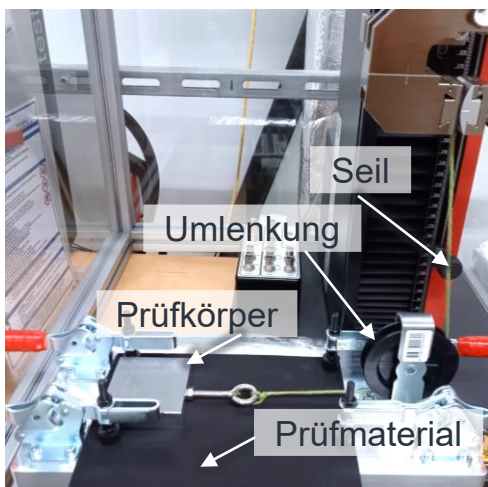


Abbildung 7-9: Versuchsaufbau zur Reibwertprüfung

Abbildung 7-10 veranschaulicht exemplarisch die aufgenommenen Messwerte der Reibungskoeffizienten zwischen der NMC622-Kathode mit einem Verdichtungsgrad von 10 % und dem CFK Rollenmaterial. Aus der Abbildung geht die Definition des statischen Haftreibungskoeffizienten μ_{stat} und des dynamischen Gleitreibungskoeffizienten μ_{dyn} hervor. Der statische Haftreibungskoeffizient ist der maximale Reibkoeffizient, bevor der Prüfkörper sich in Bewegung setzt. Der dynamische Gleitreibungskoeffizient ergibt sich als durchschnittlicher Reibungskoeffizient in dem Bereich in dem sich der Prüfkörper in Bewegung befindet.

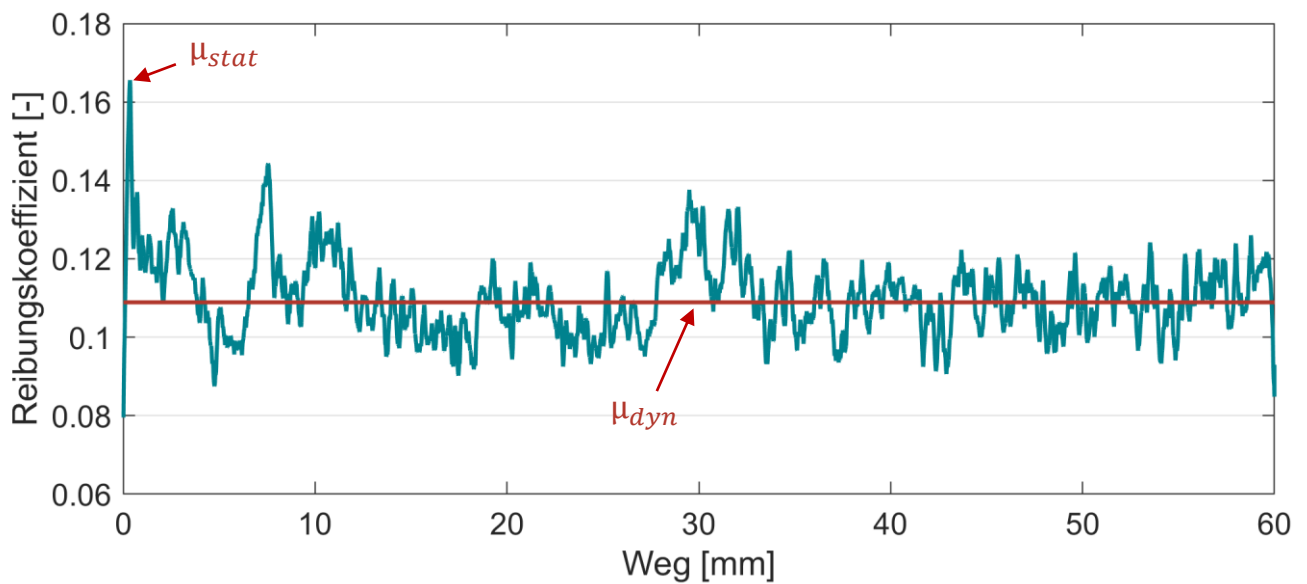


Abbildung 7-10: Reibungskoeffizienten zwischen NMC622-Kathode (10 % Verdichtung) und CFK

Abbildung 7-11 zeigt die ermittelten Reibungskoeffizienten zwischen den Elektroden- und der CFK-Oberfläche.

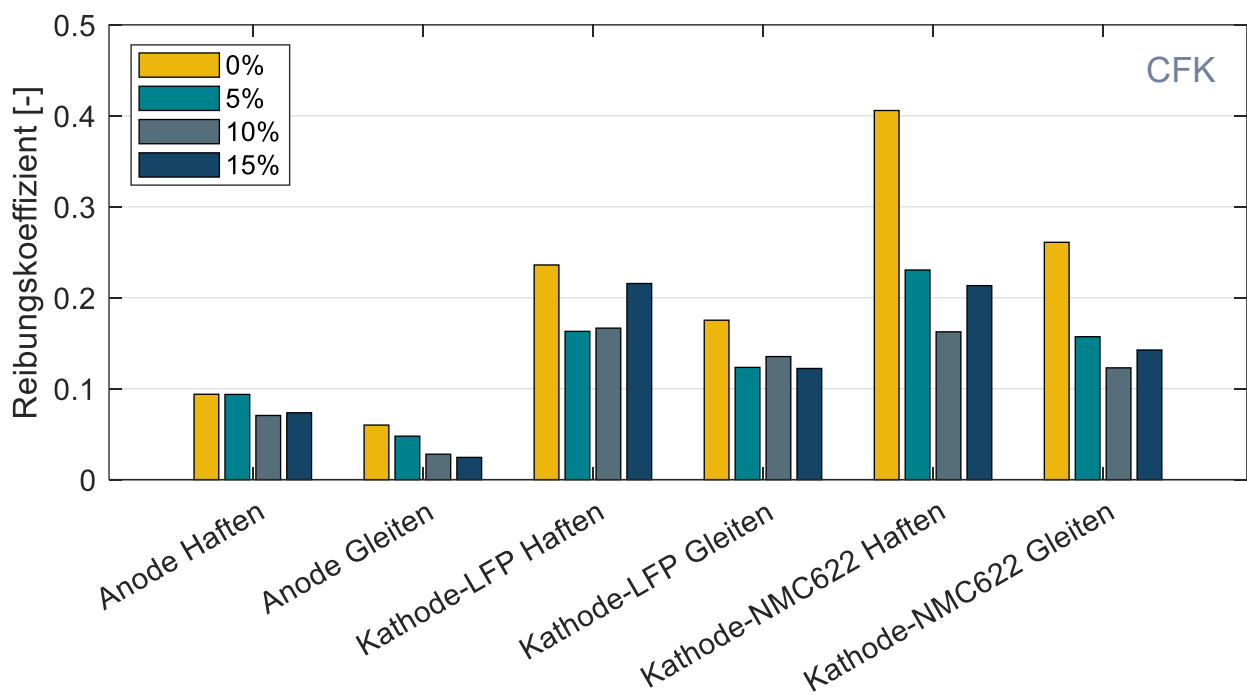


Abbildung 7-11: Ermittelte Reibungskoeffizienten der Elektroden (CFK)

In der Abbildung sind für die betrachteten Materialien mit den unterschiedlichen Verdichtungsgraden sowohl der statische Haftreibungskoeffizient als auch der dynamische Gleitreibungskoeffizient dargestellt. Zunächst ist zu erkennen, dass die Koeffizienten

beider Reibungsarten bei der Anode im Vergleich zu den anderen Elektroden insgesamt für alle Verdichtungsgrade geringer ausfallen. Weiterhin wird deutlich, dass die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten bei den unkalandrierten Elektroden höher ausfallen. Dies kann z. B. durch die auftretende Glättung der Elektrodenoberfläche nach dem Kalandrierprozess begründet werden. So ist die unkalandrierte Oberfläche tendenziell rauer als eine kalandrierte Oberfläche. Eine direkte Reduktion der Reibungskoeffizienten mit steigendem Verdichtungsgrad ist in diesem Fall nicht direkt ersichtlich. Gegebenenfalls kann bei einer weiteren Erhöhung der Verdichtungsgrade ein entsprechender Effekt festgestellt werden. Zudem fallen die statischen Haftreibungskoeffizienten für die unterschiedlichen Materialien höher aus als die dynamischen Gleitreibungskoeffizienten. Die Abbildung 7-12 zeigt die ermittelten Reibungskoeffizienten der Elektroden- und der Aluminiumoberfläche.

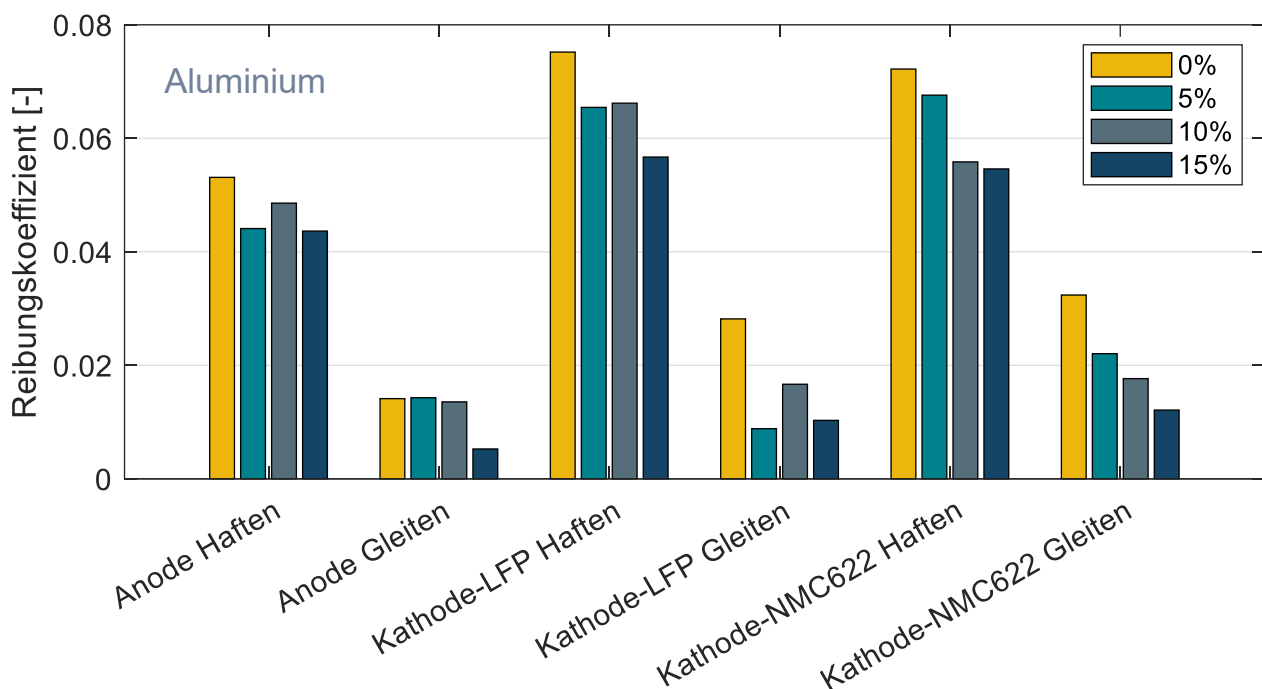


Abbildung 7-12: Ermittelte Reibungskoeffizienten der Elektroden (Aluminium)

Zunächst ist festzuhalten, dass für alle Materialien die statischen Haftreibungskoeffizienten erkennbar höher ausfallen als die dynamischen. Weiterhin ist auch hier zu erkennen, dass die Reibungskoeffizienten für Haften und Gleiten der unkalandrierten Materialien ebenfalls im Vergleich zu den kalandrierten Materialien höher ausfallen. Zusätzlich ist festzustellen, dass die ermittelten Reibungskoeffizienten für die Elektrode-Aluminium-Oberflächenpaarung im Vergleich zu dem ermittelten Wert der Elektrode-

CFK-Oberflächenpaarung merklich geringer ausfallen. Somit kann festgehalten werden, dass die betrachtete Aluminiumoberfläche der entsprechenden Umlenkrollen im Vergleich zu dem CFK zu geringeren Reibeffekten führt. Durch die unternommenen Reibprüfungen wird gezeigt, dass die entsprechenden Koeffizienten von dem Elektrodenmaterial, dessen Verdichtungsgrad und vor allem von der Oberfläche des Prüfkörpers respektive der Rollenoberfläche abhängig sind. Im Hinblick auf eine Kopplung von Parametern des Kalandrierprozesses mit anschließenden bahnführenden Prozessen können diese Reibungskoeffizienten als abhängige Parameter des Verdichtungsgrades verwendet werden. Tabelle 7-5 fasst die gemessenen statischen Haftreibungs- und dynamischen Gleitreibungskoeffizienten für die unterschiedlichen Elektroden und Verdichtungsgrade zusammen. Diese Werte werden dazu genutzt, die Teilmodelle der Umlenkrollen des flexiblen Vereinzelungsmoduls zu parametrieren.

Tabelle 7-5: Reibungskoeffizienten der Elektroden

Material-kombination	Verdichtungs-grad [%]	Haftreibungskoeffizient [-]	Gleitreibungskoeffizient [-]
Anode-CFK	0	0,094	0,059
	5	0,094	0,048
	10	0,071	0,028
	15	0,074	0,024
Anode-AL	0	0,053	0,014
	5	0,044	0,014
	10	0,049	0,014
	15	0,043	0,005
Kathode-LFP-CFK	0	0,236	0,175
	5	0,163	0,123
	10	0,167	0,135
	15	0,216	0,122
Kathode-LFP-AL	0	0,075	0,028
	5	0,065	0,008
	10	0,066	0,017
	15	0,057	0,010
Kathode-NMC622-CFK	0	0,406	0,261
	5	0,230	0,157
	10	0,162	0,123
	15	0,213	0,143
Kathode-NMC622-AL	0	0,072	0,032
	5	0,067	0,022
	10	0,055	0,017
	15	0,054	0,012

7.2.1.2 Kennwertermittlung Separatoren

Analog zu den Untersuchungen der Elektroden werden ebenfalls Zug- und Reibwertversuche mit unterschiedlichen Separatormaterialien durchgeführt. Bei den Separatoren handelt es sich zum einen um einen polymerbasierten Separator des Herstellers *Celgard*. Dieser ist ein dreilagiger Separator, bestehend aus einer Polypropylenschicht, einer Polyethylenschicht und erneut einer Polypropylenschicht. Die Gesamtdicke beträgt 20 μm . Zum anderen wird ein Vliesstoff-Separator mit keramischer Beschichtung mit dem Handelsnamen *Separion* betrachtet. Der Separator hat eine Gesamtdicke von 30 μm und besteht aus einer Polyethylenterephthalat-Vliesmatte. Diese Matte ist beidseitig mit einer Keramikschicht aus Aluminosilikaten beschichtet (Schäfer 2012). Die an dieser Stelle dargestellten Arbeiten orientieren sich an den in (A_Boschert 2023) durchgeführten und in (Husseini et al. 2024b) präsentierten Ergebnissen.

Zugversuche

Für die Zugversuche werden ebenfalls pro Separatormaterial jeweils 10 Proben erstellt und charakterisiert. Die Abmessungen der Proben sind auch der Abbildung 7-5 zu entnehmen. Abbildung 7-13 veranschaulicht die Ergebnisse der Zugprüfung. Dargestellt sind die ermittelten E-Module (links) und die Dehngrenze (rechts) für den Polymer- und Vliesstoff-Separator.

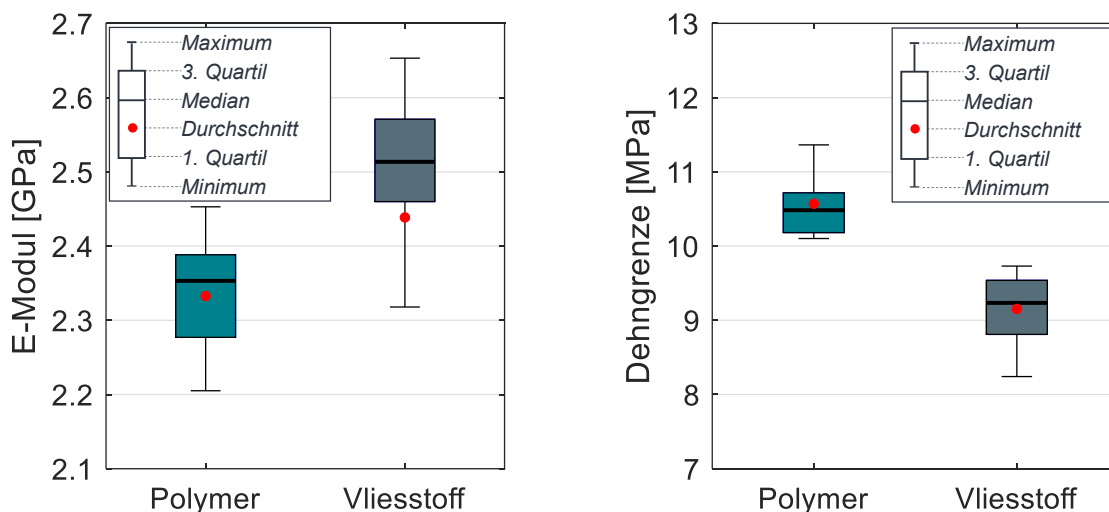


Abbildung 7-13: Auswertung der gemessenen E-Module (links) und der Dehngrenzen (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024b))

Insgesamt ist der gemittelte E-Modul bei dem polymeren Separator geringer als bei dem Vliesstoff-Separator. Die Dehngrenze ist jedoch höher. Der polymere Separator

neigt zudem eher zu einer plastischen Verformung als der Vliesstoff-Separator. Tabelle 7-6 veranschaulicht die entsprechenden Mittelwerte der E-Module und Dehngrenzen der betrachteten Separatormaterialien.

Tabelle 7-6: Mittelwerte der E-Module und Dehngrenzen der Separatoren

Separator	E-Modul [GPa]	Dehngrenze [MPa]
Polymer	2,333	10,570
Vliesstoff	2,439	9,152

Reibwertversuche

Die Ermittlung der Reibwerte erfolgt für die Separatormaterialien ebenfalls an einer CFK- und einer Aluminiumoberfläche. Hierbei wurde ebenfalls der in Kapitel 7.2.1.1 beschriebene Aufbau verwendet. Abbildung 7-14 und Tabelle 7-7 zeigen die ermittelten Haft- und Gleitreibungskoeffizienten für den Polymer- und Vliesstoff-Separator im Vergleich.

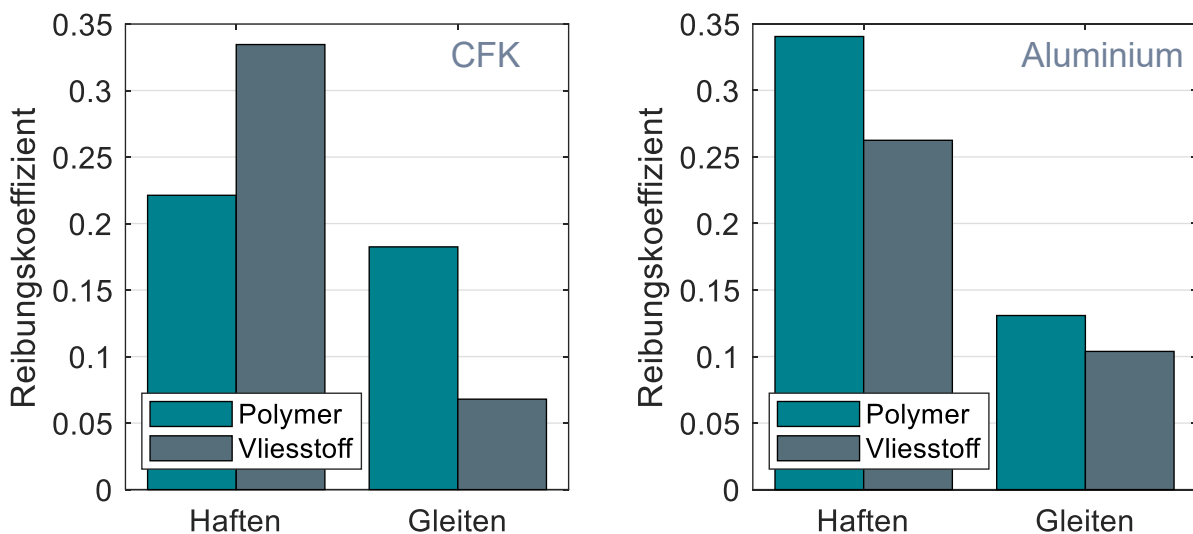


Abbildung 7-14: Ermittelte Reibungskoeffizienten für die Separatoren bei CFK- (links) und Aluminiumoberfläche (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024b))

Tabelle 7-7: Reibungskoeffizienten der Separatoren

Materialkombination	Haftreibungskoeffizient [-]	Gleitreibungskoeffizient [-]
Polymer-CFK	0,221	0,182
Vliesstoff-CFK	0,335	0,068
Polymer-Aluminium	0,341	0,131
Vliesstoff-Aluminium	0,261	0,104

Es lassen sich Unterschiede sowohl hinsichtlich der jeweiligen Reibungsart (Haftreibung/Gleitreibung) als auch in Bezug auf die entsprechenden Materialkombinationen erkennen. Der Haftreibungskoeffizient der Materialpaarung CFK – Vliesstoff-Separator ist höher als der der Materialpaarung CFK – Polymer-Separator. Der Gleitreibungskoeffizient ist jedoch niedriger. Bei der Aluminiumoberfläche sind sowohl der Haft- als auch der Gleitreibungskoeffizient bei dem Polymerseparator höher. Die Tatsache, dass der Haftreibungskoeffizient bei der CFK-Oberfläche und dem Vliesstoff-Separator höher ist als beim Polymerseparator, kann unter anderem auf erhöhte Wechselwirkungseffekte zwischen der Keramikbeschichtung des Vliesstoff-Separators und der Oberfläche des Prüfkörpers zurückgeführt werden.

7.2.2 Rundlaufgenauigkeiten

Neben der experimentellen Ermittlung der relevanten Materialkennwerte ist es ebenfalls notwendig, die Rundlaufgenauigkeiten der verbauten Umlenkrollen zu quantifizieren. Hierfür wird der in Abbildung 7-15 dargestellte Versuchsaufbau hinzugezogen. Dabei werden die einzelnen Umlenkrollen der Maschinen auf eine Grundplatte montiert und vermessen.

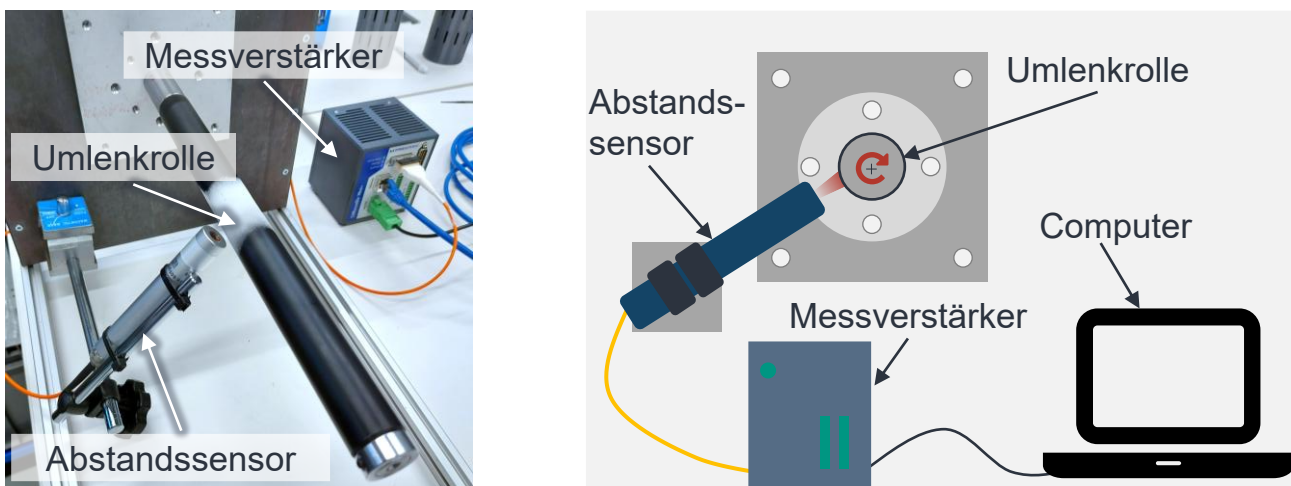


Abbildung 7-15: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Rundlaufgenauigkeit

Die Messung der Rundlaufgenauigkeit erfolgt mithilfe eines optischen Abstandssensors und eines entsprechenden Messverstärkers (*CHROCODILE MINI+*) der Firma *Precitec GmbH & Co. KG*. Der Abstandssensor hat einen Messbereich von 600 μm und verwendet zwei weiße Lichtquellen mit einem gemeinsamen Brennpunkt. Der Lichtstrahl wird durch Optiken in seine Spektralfarben aufgespalten. Mittels eines Spektrometers erfolgt schließlich die Abstandsmessung (Keferstein et al. 2018). Der Abstand zwischen

der Rolle und dem Sensor beträgt 6,5 mm. Bei den Umlenkrollen mit CFK-Mantel wird die Oberfläche mit einem weißen Farbspray besprüht, sodass das einfallende Licht des Sensors korrekt reflektiert werden kann. Die Messungen erfolgen jeweils in der Mitte der Umlenkrolle. Die Umlenkrolle wird schließlich mit konstanter Geschwindigkeit händisch einmal gedreht und die Abstandsänderung aufgezeichnet. Abbildung 7-16 veranschaulicht die Messergebnisse einer Umlenkrolle. Auf der linken Seite sind die Messergebnisse im Polarkoordinatensystem und auf der rechten Seite in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt.

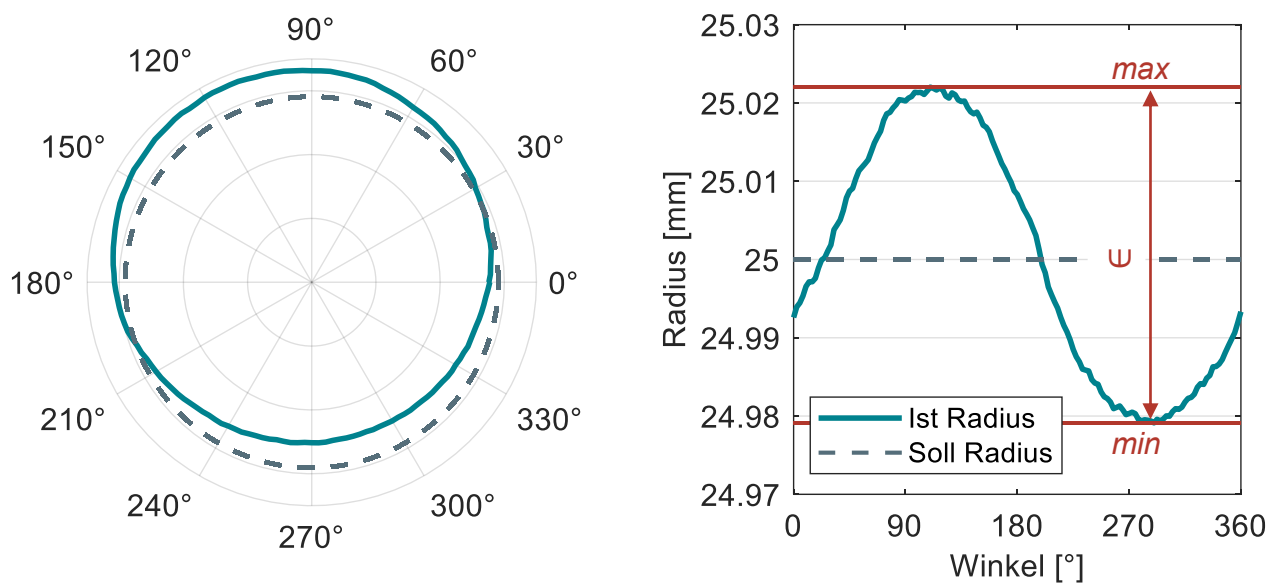


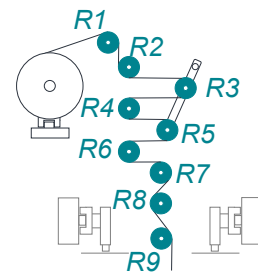
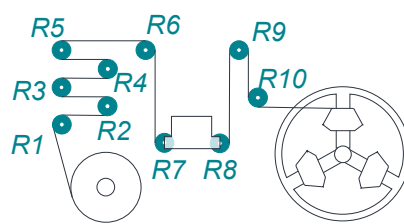
Abbildung 7-16: Gemessene Rundlaufgenauigkeit in Polarkoordinaten (links) und kartesischem Koordinatensystem (rechts)

Erkennbar ist eine Abweichung des Ist-Radius zum Soll-Radius. Diese Abweichung spiegelt sich in einem periodischen Verlauf wider. Dieser periodische Verlauf ist in allen getätigten Messungen erkennbar. Aus diesem periodischen Verlauf lässt sich die Exzentrizität ϵ ableiten. Diese wird als Abstand zwischen dem maximalen und minimalen Wert des periodischen Verlaufes definiert. Tabelle 7-7 veranschaulicht die gemessenen Exzentrizitätswerte der Umlenkrollen der beiden betrachteten Maschinen. Die Nummerierung der Umlenkrollen ist mit den Skizzen zu deren Positionen in dem jeweiligen Maschinensetup zu entnehmen. Für die später folgenden Validierungstätigkeiten wird eine *mobile* Messwalze, mit welcher der Bahnzug erfasst wird, an unterschiedlichen Positionen in den Maschinensetups integriert. Die Exzentrizität dieser Messwalze wurde ebenfalls mit dem beschriebenen Versuchsaufbau ermittelt. Der entsprechende Wert ist gleichermaßen der Tabelle 7-8 zu entnehmen. Die gemessenen Werte dienen

dazu, den Einfluss der Exzentrizität der Umlenkrollen auf etwaige Bahnzugschwankungen in den Elektroden- und Separatorbahnen gemäß den in den Gleichungen 6-19 und 6-20 beschriebenen Zusammenhängen zu quantifizieren.

Tabelle 7-8: Gemessene Exzentrizitätswerte der Umlenkrollen

Nr.	Exzentrizität der Umlenkrollen ϵ [μm]	
	Flexibles Vereinzelmassensystem	Z-Falt-Stapelmaschine
R1	46	56
R2	83	62
R3	94	153
R4	35	90
R5	114	102
R6	62	49
R7	49	42
R8	54	116
R9	76	59
R10	79	-
Messwalze	85	85



7.3 Zusammenfassung: Modellparametrierung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde die Vorgehensweise zur Parametrierung der einzelnen Teilmodelle vorgestellt. Eine Vielzahl von Kennwerten lässt sich durch Recherche von wissenschaftlichen Untersuchungen oder Datenblättern ermitteln. Hierzu zählen u. a. Wirkungsgrade von Linearführungen und Kugelgewindespindeln. Neben der Recherche besteht die Möglichkeit, über Berechnungsvorschriften und die Informationen aus den CAD-Dateien bzw. Konstruktions-/Konzeptionsunterlagen der Maschinen entsprechende Kennwerte abzuleiten. Hierzu zählen sämtliche benötigten Kennwerte zu Massen, Trägheitsmomenten, Geometrien und Positionen einzelner Komponenten. Weiterhin wurde zur Ermittlung entsprechender materialbezogener Parameterkennwerte und der Rundlaufgenauigkeit der Umlenkrollen eine experimentelle Vorgehensweise gewählt. Bei den materialbezogenen Kennwerten handelt es sich um den E-Mo-

dul, welcher für die Anwendung der Materialbahnmodelle benötigt wird, und um Kennwerte zu dem statischen Haftreibungs- und dem dynamischen Gleitreibungskoeffizienten zwischen der Material- und Rollenoberfläche. Für einen umfassenden Überblick wurden unterschiedliche Materialsysteme der Elektroden und Separatoren verwendet und der Einfluss des Kalandriergrades auf die entsprechenden Kennwerte der Elektroden wurde dargestellt. Hierbei ist festzuhalten, dass sowohl die ermittelten Kennwerte zum E-Modul als auch die Reibungskoeffizienten in Bezug auf eine Kopplung von einem möglichen Modell des Kalandrierens eine geeignete Schnittstelle darstellen. Die ermittelten Werte werden anschließend dazu genutzt, die bereits formulierten Teilmodelle der Maschinenmodelle zu parametrieren. Hierzu werden die ermittelten Werte in dem Simulationstool *Simcenter Amesim* für das jeweilige Teilmodell hinterlegt.

8 Validierung der Modellgüte

In den folgenden Ausarbeitungen wird die Validierung der Güte der entwickelten Maschinenmodelle anhand verschiedener Produktionsszenarien vorgestellt. Hierbei werden zunächst unterschiedliche Produktionsszenarien definiert und mittels der betrachteten Maschinen die Elektroden- und Separatormaterialien verarbeitet. Während der Verarbeitung werden reale Datensätze zu der auftretenden Materialbelastung aufgenommen und mit den Simulationsdaten verglichen. Hierdurch wird die Modellgüte der Gesamtmodelle quantifiziert.

8.1 Versuchsaufbauten und -pläne

Für die Validierung werden Versuchspläne definiert, welche dann an den realen Maschinen umgesetzt werden. Die Zielgröße zur Validierung ist der auftretende Bahnzug an den Elektroden- und Separatormaterialien. Dieser wird mittels einer Messwalze und eines entsprechenden Verstärkers aufgenommen. Hierbei werden die Messwalze des Typs *BTL400* und der Verstärker *BTA200* von der *BST GmbH* verwendet. Die Datenaufnahme erfolgt über eine Steuerungseinheit der *Baureihe S1200* respektive *S1500* der *Siemens AG*. Die Messdaten werden mit einer Frequenz von 10 Hz aufgezeichnet und mittels *Open Platform Communications Unified Architecture (OPCUA)* Schnittstelle bereitgestellt. Für die an den Maschinen erreichbaren Geschwindigkeiten wird die Aufnahmefrequenz als ausreichend betrachtet. Das Ziel besteht darin, grundlegende Schwankungen aufzuzeigen. Die konkrete Datenaufnahme und Verarbeitung erfolgen mittels Matlab-Skript. Ziel ist es, eine umfangreiche Variation von Parametern durchzuführen, mit welchen dann die Ergebnisse der jeweiligen Modelle charakterisiert werden. Auf eine direkte Verifizierung der einzelnen Teilmodelle wird verzichtet. Diese basieren auf den dargestellten physikalischen Gleichungssystemen, welche in den entsprechenden Bausteinen der Software *Simcenter Amesim* implementiert sind. Es wird davon ausgegangen, dass die Teilmodelle daher in ihrer Funktionsweise verifiziert sind. Im Folgenden werden die definierten Versuchsaufbauten und Pläne vorgestellt.

8.1.1 Flexibles Vereinzelungsmodul

An dieser Stelle wird der Versuchsplan für die Modellvalidierung an dem flexiblen Vereinzelungsmodul vorgestellt. Verwendet wird ein vollfaktorieller Versuchsplan mit fünf Faktoren und zwei Faktorstufen, wodurch sich 32 Kombinationen ergeben. Hierbei werden die einstellbaren Maschinenparameter, Materialien und die Position der Messwalze

variiert. Die einstellbaren Maschinenparameter sind die Bahn- respektive Ablegegeschwindigkeit v_{Bahn} des Handhabungssystems, der zu regelnde Soll-Bahnzug $F_{Bahn,soll}$ und die zu vereinzelnende Elektrodenblattlänge L_{Sheet} . Der Bahnzug wird an zwei unterschiedlichen Positionen erfasst. Die Materialien, welche hier verwendet werden, beziehen sich auf die graphitische Anode mit einem Verdichtungsgrad von 5 % und auf die LFP-Kathode mit einem Verdichtungsgrad von 15 %. Abbildung 8-1 veranschaulicht den Versuchsaufbau an dem flexiblen Handhabungssystem.

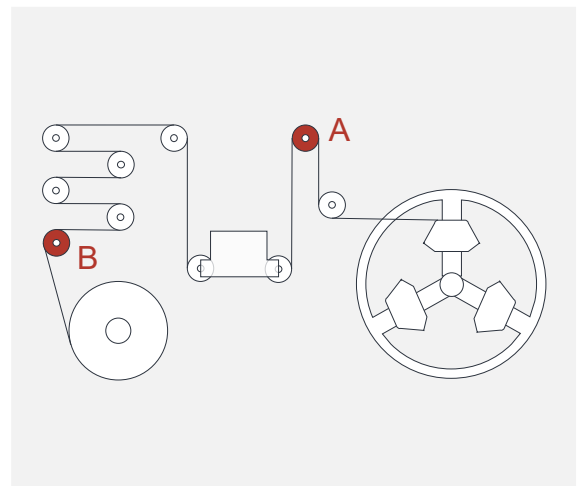
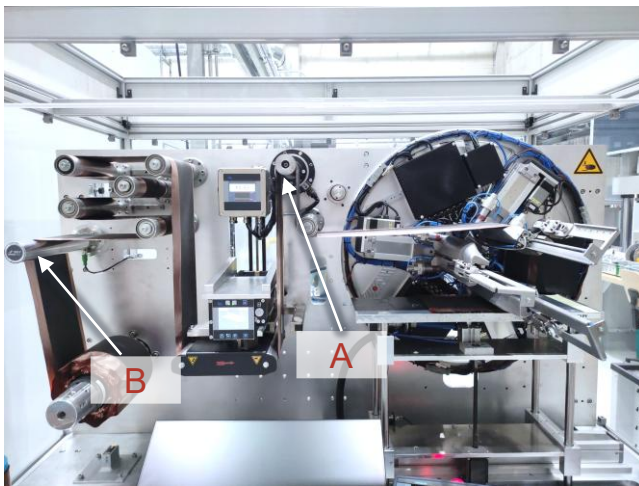


Abbildung 8-1: Versuchsaufbau am flexiblen Vereinzlungsmodul

Weiterhin sind in der Abbildung die gewählten Messpositionen der Rollen dargestellt. Die auftretenden Werte an der Messposition A werden verwendet, um den Bahnzug in der Maschine zu regeln. Weiterhin werden Daten an der Messposition B aufgenommen. Hierdurch sollen ebenfalls die auftretenden Bahnzugsschwankungen am Anfang des Materialflusses beleuchtet werden.

Geschwindigkeit v_{Bahn}	Soll-Bahnzug $F_{Bahn,soll}$	Sheetlänge L_{Sheet}	Material	Messposition
8 mm/s	8 N	180 mm	Anode (5%)	A
16 mm/s	12 N	260 mm	Kathode LFP (15%)	B

Abbildung 8-2: Parameterkombinationen der vollfaktoriellen Untersuchung an dem flexiblen Vereinzlungsmodul

Abbildung 8-2 veranschaulicht die Parameterkombinationen der vollfaktoriellen Untersuchungen an dem flexiblen Vereinzlungsmodul.

8.1.2 Z-Falt-Stapelmaschine

Im Folgenden werden der Versuchsaufbau und -plan zur Validierung der Güte des Modells der Z-Falt-Stapelmaschine vorgestellt. Verwendet wird ebenfalls ein vollfaktorieller Versuchsplan. Dieser beinhaltet vier verschiedene Faktoren. Diese beziehen sich auf das verwendete Separatormaterial, auf die mittlere Tischgeschwindigkeit v_{Tisch} , den eingestellten Druck im Pneumatikzylinder $P_{Tänzer}$ des Tänzers und ebenfalls auf zwei Messpositionen. Da die mittlere Tischgeschwindigkeit als Einstellparameter ausschlaggebend für die auftretenden Belastungen an dem Separatormaterial ist, werden hier drei Faktorstufen gewählt. Für die restlichen Faktoren werden zwei Faktorstufen gewählt. Für die Untersuchungen ergeben sich somit 24 Versuche. Abbildung 8-3 veranschaulicht den Versuchsaufbau an der Z-Falt-Stapelmaschine.

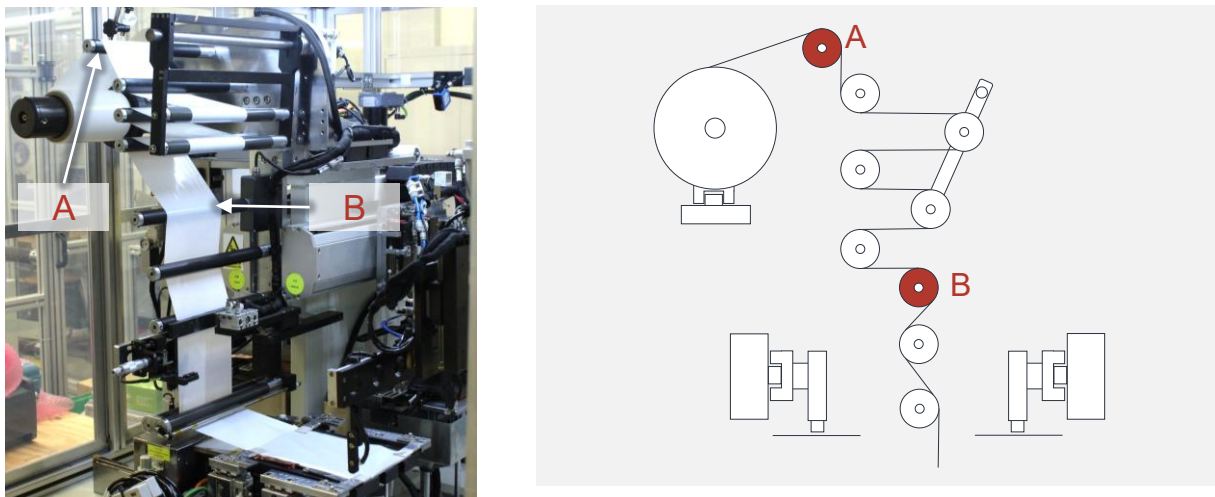


Abbildung 8-3: Versuchsaufbau an der Z-Falt-Stapelmaschine

Ebenfalls dargestellt sind hier die Positionen der Messwalzen.

Zylinderdruck $P_{Tänzer}$	Tischgeschw. v_{Tisch}	Material	Messposition
0,2 MPa	75 mm/s	Polymer Separator	A
0,3 MPa	124 mm/s	Vliesstoff Separator	B
	143 mm/s		

Abbildung 8-4: Parameterkombinationen der vollfaktoriellen Untersuchung an der Z-Falt-Stapelmaschine

Position A befindet sich am Anfang des Materialflusses direkt nach dem Abwickler. Position B liegt hinter dem Tänzersystem. Abbildung 8-4 veranschaulicht die Parameterkombinationen der vollfaktoriellen Untersuchung an der Z-Falt-Stapelmaschine.

8.2 Versuchsergebnisse und Interpretation

In den folgenden Ausarbeitungen werden die Ergebnisse der Validierungsversuche und der Vergleich zu den simulierten Datensätzen vorgestellt. Verglichen werden Zeitreihendatensätze zu den auftretenden Bahnbelastungen an den dargestellten Messpositionen in den Maschinen. Die Messdauer für das flexible Vereinzelungsmodul beträgt ca. 100 Sekunden, bei der Z-Falt-Stapelmaschine 30 Sekunden. Die Dauer wurde so gewählt, dass entsprechende periodische Schwankungen im Bahnzug dargestellt werden. Für die Validierung wird der in (Viehof & Winner 2017) beschriebene grafische und objektive Vergleich durchgeführt. Beim grafischen Vergleich werden die Mess- und Simulationsdaten hinsichtlich ihrer relevanten charakteristischen Merkmale wie z. B. Periodizität, Steigung, Symmetrie, Lage und Höhe von Extrema miteinander verglichen. Hierdurch soll eine grundlegende erste Einordnung vermittelt werden, inwieweit die Simulationsdaten den gemessenen Validierungsdaten entsprechen. Zusätzlich zu dem grafischen erfolgt der objektive Vergleich. Hierbei wird die Abweichung anhand spezifischer Kennwerte quantifiziert. Für die Quantifizierung wird der statistische Kennwert *Root Mean Square Error* (RMSE) herangezogen. Dieser Kennwert ist die Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers. Hierdurch ist sichergestellt, dass sich positive und negative Abweichungen nicht gegenseitig aufheben. Gleichung 8-1 veranschaulicht die Berechnung des RMSE.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{\lambda}_i - \lambda_i)^2}{N}} \quad 8-1$$

mit

n = Anzahl der Wertepaare
 $\hat{\lambda}_i$ = Wert i der Validierungsdaten
 λ_i = Wert i der Simulationsdaten

Weiterhin wird als Kennwert der *Normalized Root Mean Square Error* (NRMSE) herangezogen. Der NRMSE ist die normalisierte Variante des RMSE. Hierdurch lässt sich die Modellgüte unabhängig von der Skalierung der Simulations- und Messdaten bewerten. Die Berechnungsvorschrift des NRMSE wird in der Gleichung 8-2 dargestellt.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\max(\hat{\lambda}) - \min(\hat{\lambda})} \quad 8-2$$

mit
 $\hat{\lambda}$ = Validierungsdatensatz

In den folgenden Ausarbeitungen werden die Validierungsergebnisse für das flexible Vereinzelungsmodul und die Z-Falt-Stapelmaschine dargestellt, erläutert und kritisch bewertet. Hierbei wird die beschriebene Methodik des grafischen Vergleichs und des objektiven Vergleichs mittels RMSE und NRMSE verwendet. Im Hinblick auf die Anforderungen an die Modellgüte ist festzuhalten, dass die Modelle grundsätzlich die zeitlichen Verläufe, charakteristischen Schwankungen sowie die Größenordnung der Bahnzugkräfte abbilden sollen. Eine detaillierte Analyse der Ergebnisse wird nachfolgend gegeben.

8.2.1 Flexibles Vereinzelungsmodul

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Modellvalidierung für das flexible Vereinzelungsmodul vorgestellt und diskutiert. In Tabelle 8-1 werden diese zusammengefasst. Details sind dem Anhang B zu entnehmen. Hier sind die durchgeführten Versuchs- respektive Simulationssetups mit den dazugehörigen Parameterkombinationen dargestellt.

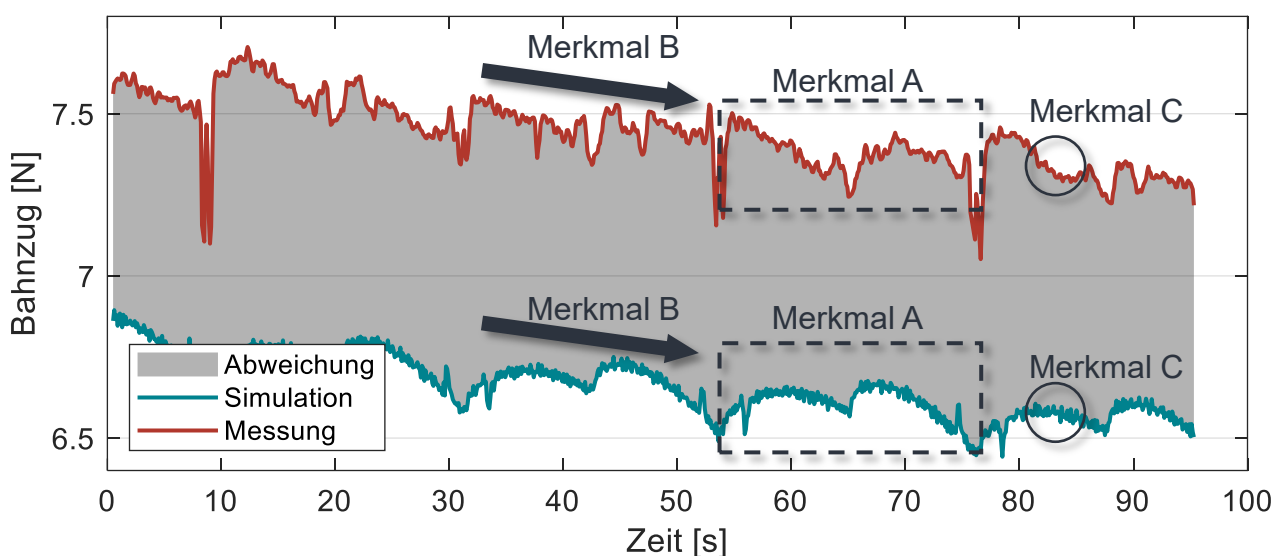
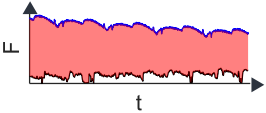
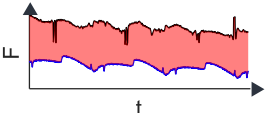
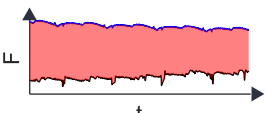
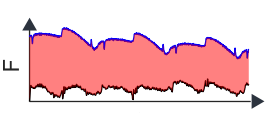
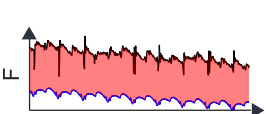
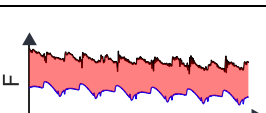
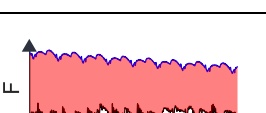
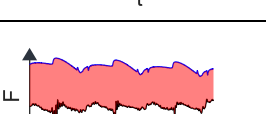
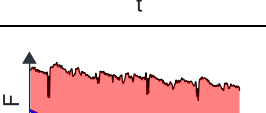
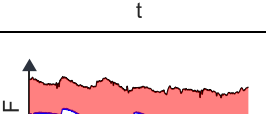
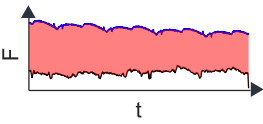
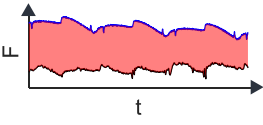
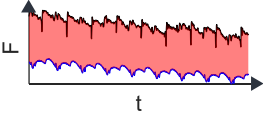
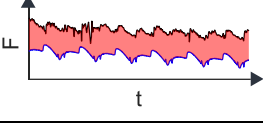
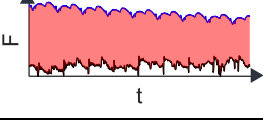
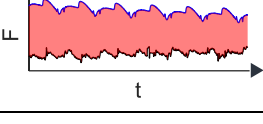
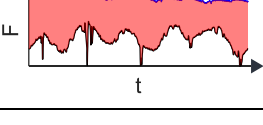
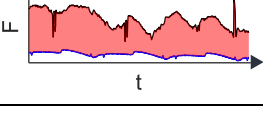
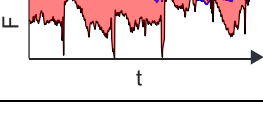
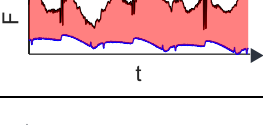
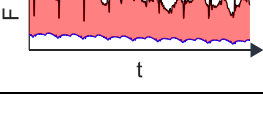


Abbildung 8-5: Beispielergebnisse der Modellvalidierung an dem flexiblen Vereinzelungsmodul

Zu jedem Setup wird weiterhin ein qualitativer grafischer Vergleich zwischen den simulierten und gemessenen Bahnzugwerten der jeweiligen Setups dargestellt. Ferner werden die Ergebnisse des objektiven Vergleichs in Form des RMSE und NRMSE veranschaulicht.

Tabelle 8-1: Ergebnisse Modellvalidierung: flexibles Vereinzelmessmodul

Nr.	Grafischer Vergleich 	v_{Bahn} [mm/s]	$F_{Bahn,soll}$ [N]	L_{Sheet} [mm]	Material	Messposition	RMSE [N]	NRMSE [-]
1		8	6	180	Anode	A	1,003	3,235
2		8	6	260	Anode	A	1,086	1,294
3		8	10	180	Anode	A	1,993	3,076
4		8	10	260	Anode	A	0,960	2,103
5		16	6	180	Anode	A	0,829	1,065
6		16	6	260	Anode	A	0,862	1,249
7		16	10	180	Anode	A	0,994	2,566
8		16	10	260	Anode	A	1,131	1,264
9		8	6	180	LFP	A	0,780	1,192
10		8	6	260	LFP	A	0,858	1,483

Nr.	Grafischer Vergleich 	v_{Bahn} [mm/s]	$F_{Bahn,soll}$ [N]	L_{Sheet} [mm]	Material	Messposition	RMSE [N]	NRMSE [-]
11		8	10	180	LFP	A	1,193	1,944
12		8	10	260	LFP	A	1,145	2,571
13		16	6	180	LFP	A	0,770	1,197
14		16	6	260	LFP	A	0,680	0,975
15		16	10	180	LFP	A	1,048	2,613
16		16	10	260	LFP	A	1,193	2,709
17		8	6	180	Anode	B	1,659	0,946
18		8	6	260	Anode	B	1,959	0,799
19		8	10	180	Anode	B	0,560	0,376
20		8	10	260	Anode	B	1,270	0,834
21		16	6	180	Anode	B	1,547	0,901

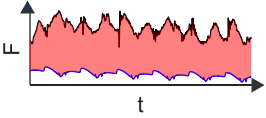
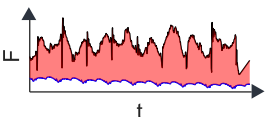
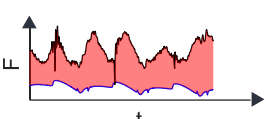
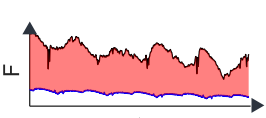
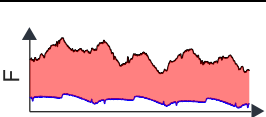
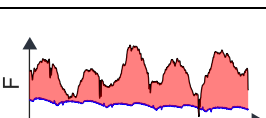
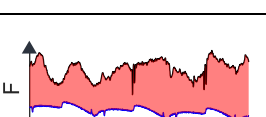
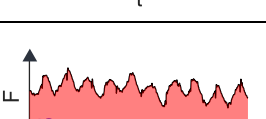
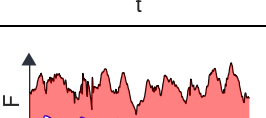
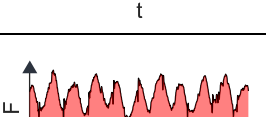
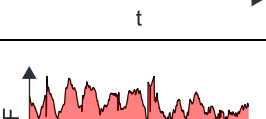
Nr.	Grafischer Vergleich 	v_{Bahn} [mm/s]	$F_{Bahn,soll}$ [N]	L_{Sheet} [mm]	Material	Messposition	RMSE [N]	NRMSE [-]
22		16	6	260	Anode	B	1,856	1,267
23		16	10	180	Anode	B	1,329	0,656
24		16	10	260	Anode	B	1,176	0,647
25		8	6	180	LFP	B	1,678	0,861
26		8	6	260	LFP	B	1,917	1,235
27		8	10	180	LFP	B	1,110	0,490
28		8	10	260	LFP	B	1,318	0,968
29		16	6	180	LFP	B	1,884	0,864
30		16	6	260	LFP	B	1,428	0,743
31		16	10	180	LFP	B	1,451	0,725
32		16	10	260	LFP	B	1,200	0,625

Abbildung 8-5 veranschaulicht stellvertretend und exemplarisch den detaillierten Vergleich zwischen den simulierten und den gemessenen Bahnzugwerten des Setups Nr. 9 (vgl. Tabelle 8-1). Hierbei lassen sich unterschiedliche Merkmale erkennen. Die wesentlichen Merkmale für einen grafischen Vergleich sind in der Abbildung markiert. Zunächst ist festzuhalten, dass sich ein periodischer Verlauf der Bahnzugschwankungen, Merkmal A, beobachten lässt. Dieser periodische Verlauf ist auf das grundsätzliche Bewegungsprofil der Maschine und die polygonförmige Gestalt der drei Greiferelemente zurückzuführen. Weiterhin ist erkennbar, dass der Soll-Bahnzugwert von 6 N nicht erreicht wird. Der Bahnzug wird in den durchgeführten Studien mittels der Ansteuerung des Abwicklers und eines PID-Reglers an der Position A geregelt. Gleichung 8-3 veranschaulicht einen Teil der Regelstrecke. Die Stellgröße zur Regelung des Bahnzuges ist die Drehzahl des Abwicklers $n_{Abwickler}$. Die Drehzahl wird initial so veranschlagt, dass die Tangentialgeschwindigkeit am Coil der Bahngeschwindigkeit am Einlaufpunkt des Handhabungssystems entspricht. Der Faktor PID entspricht dem Ausgang des Regler-Elements.

$$n_{Abwickler} = \frac{vt_{HHS} * 360^\circ}{D_{Abwickler} * \pi} * PID \quad 8-3$$

mit

vt_{HHS} = Tangentialgeschwindigkeit am Handhabungssystem

$D_{Abwickler}$ = Durchmesser des Abwicklers

Die hierbei verwendeten Verstärkungsfaktoren für den Regler belaufen sich auf $KP = 0,076$, $KI = 0,00034$ und $KD = 0$. Diese werden ebenfalls in dem Teilmodell des Reglers innerhalb des Gesamtmodells des flexiblen Vereinzelungsmoduls verwendet. Das Merkmal B der grafischen Auswertung zeigt, dass die Regelung des Bahnzuges nicht performant genug ist, um den geforderten Sollwert zu erreichen. Stattdessen ist ein langsamer Abfall eines generell zu hohen Bahnzuges zu erkennen. Weiterhin können geringfügige höherfrequente Bahnzugschwankungen als weiteres Merkmal (Merkmal C) identifiziert werden. Die Ursache hierfür liegt sowohl im elastischen Materialverhalten als auch in den maschinenbedingten Schwingungen. Diese drei Merkmale sind in unterschiedlichen Ausprägungen in den weiteren Setups identifizierbar. In dem dargestellten Beispiel kann festgehalten werden, dass diese Merkmale sich ebenfalls in den simulierten Werten widerspiegeln. Es lässt sich dennoch eine systematische Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Daten feststellen. Erkennbar ist eine konstante Differenz zwischen den beiden Datensätzen. Ein wesentlicher Grund hierfür

ist der vorliegende Bahnzug zu Beginn des Prozesses. Dieser ist nicht direkt einstellbar und hängt insbesondere von dem manuellen Rüstvorgang der Maschine ab. Dieser anfängliche Bahnzug wird in dem Modell nicht betrachtet.

Zur weiteren Einschätzung der Modellgüte werden in der Tabelle 8-2 die parameterabhängigen Mittelwerte der RMSE- und NRMSE-Kennzahlen dargestellt. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Modellgüte insbesondere von der Messposition abhängig ist. Die markierten Bereiche heben den jeweiligen Maximalwert hervor. Der maximale gemittelte RMSE-Wert von 1,459 N ist der Messposition B zuzuordnen und der maximale gemittelte NRMSE-Wert von 1,909 der Messposition A. Dies mag zunächst widersprüchlich erscheinen.

Tabelle 8-2: Auswirkungen gewählter Parameter auf die Modellgüte (flexibles Vereinzelungsmodul)

Parameter		RMSE-Mittelwert [N]	NRMSE-Mittelwert
v_{Bahn} [mm/s]	8	1,281	1,463
	16	1,211	1,254
$F_{Bahn,soll}$ [N]	6	1,300	1,207
	10	1,192	1,510
L_{Sheet} [mm]	180	1,239	1,419
	260	1,252	1,298
Material	Anode	1,263	1,392
	Kathode	1,228	1,325
Messposition	A	1,033	1,909
	B	1,459	0,809

Durch das Hinzuziehen des grafischen Vergleichs wird ersichtlich, dass es bei den Messdaten bei der Position B zu einem generell höheren Schwingungsverhalten als bei der Position A kommt. Die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert, welche zur Berechnung des NRMSE verwendet wird, fällt bei den Messungen an Position B höher aus. Dies führt schlussendlich zu einem kleineren NRMSE-Wert. Allerdings wird die Modellgüte für die Position A durch das weitere Hinzuziehen des grafischen Vergleichs höher eingestuft. Mögliche Gründe für eine schlechtere Güte an der Position B liegen z. B. in einer unzureichenden Modellierung des Elektrodencoils hinsichtlich der Rundheit oder einer unzureichend genauen Parametrierung der Komponenten der Umlenkrollen hinsichtlich Lagerreibwerten. Von höherer Bedeutung sind vor allem die auftretenden Schwankungen in der Nähe des Handhabungssystems. An dieser Stelle wird die simulative Abbildung der Schwankungen als ausreichend eingestuft. Die zeitlichen Verläufe und die Größenordnung der Bahnzüge werden abgebildet.

8.2.2 Z-Falt-Stapelmaschine

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellvalidierung für die Z-Falt-Stapelmaschine dargestellt und diskutiert. Tabelle 8-3 veranschaulicht die Ergebnisse der 24 durchgeführten Versuche und Simulationen. Details sind dem Anhang C zu entnehmen. Hier sind ebenfalls ein grafischer Vergleich und die entsprechenden statistischen Kenngrößen RMSE und NRMSE dargestellt. Abbildung 8-6 veranschaulicht beispielhaft die Ergebnisse des Vergleichs der Mess- und Simulationsdaten anhand von Versuch Nr. 21 (vgl. Tabelle 8-3).

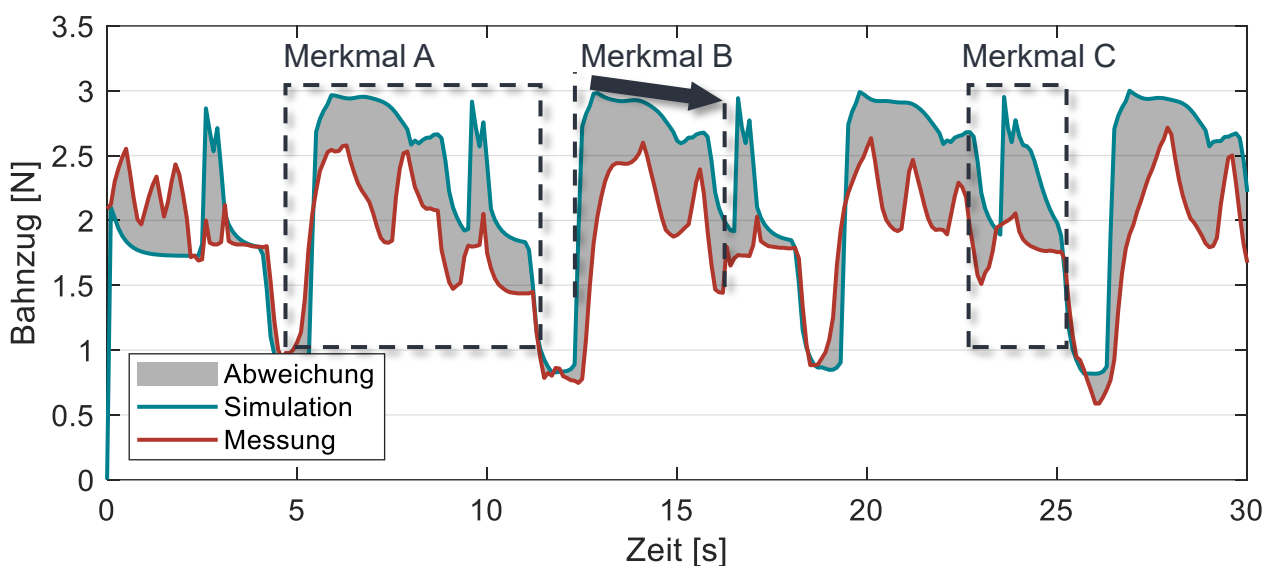
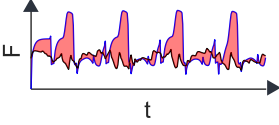
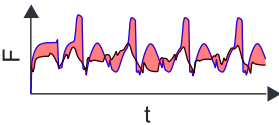
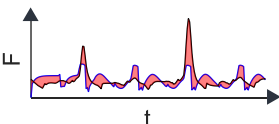
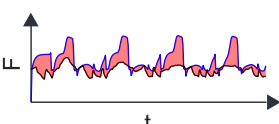
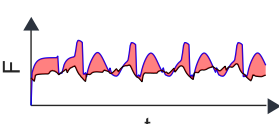
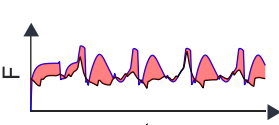
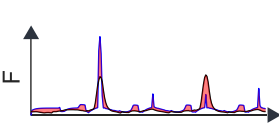


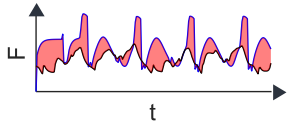
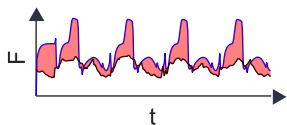
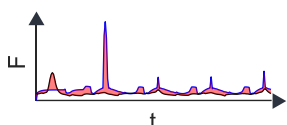
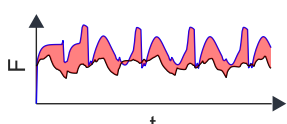
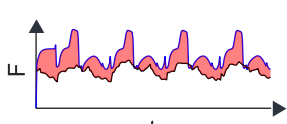
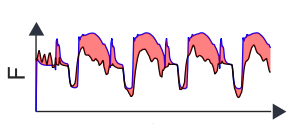
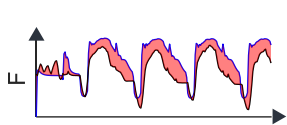
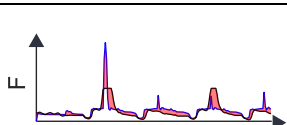
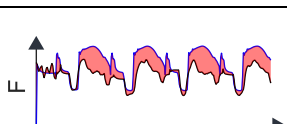
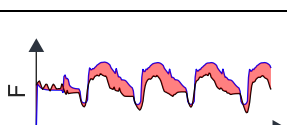
Abbildung 8-6: Beispielergebnisse der Modellvalidierung an der Z-Falt-Stapelmaschine

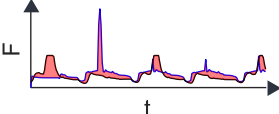
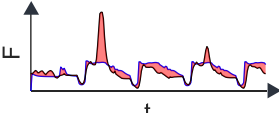
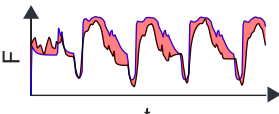
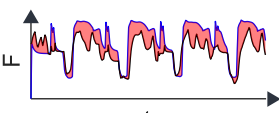
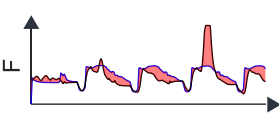
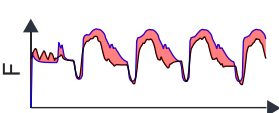
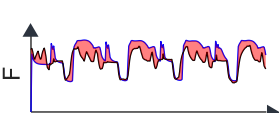
Aus der Abbildung 8-6 geht hervor, dass während des Stapelprozesses ebenfalls ein periodischer Verlauf des Bahnzuges des Separators erkennbar ist. Dieser Effekt ist in der Abbildung durch das Merkmal A gekennzeichnet. Der periodische Verlauf korreliert mit der Bewegung des Stapeltisches. Die horizontalen Beschleunigungsvorgänge bedingen eine Erhöhung des Bahnzuges an der Separatorbahn. Insbesondere liegt hier der Grund in einer Verzögerung des Materialflusses am Abwickler. An den Tiefpunkten der Bahnzugverläufe erfolgt das Ablegen der Elektrodenblätter auf den Zellstapel. Der Stapeltisch steht zu diesem Zeitpunkt still. Der hier wirkende Bahnzug resultiert vor allem aus der Krafteinwirkung des Tänzersystems auf die Separatorbahn. Die Simulationsdaten bilden diesen periodischen Verlauf ebenfalls ab. Weiterhin ist in dem Merkmal B ein Abflachen des Bahnzuges erkennbar. Dieses Abflachen resultiert durch die verzögerte Reaktion des Abwicklers. Die Extrema, die generellen Kurvenverläufe und

die Größenordnung der simulierten Daten liegen in einem ähnlichen Bereich wie die Messdaten. Weiterhin wird in dem Merkmal C das Einwirken der Klemmfinger des Stapeltisches auf den Bahnzug erkennbar, vor allem im Simulationsdatensatz. Die Modellgüte wird hierbei insgesamt als akzeptabel angesehen. Die dargestellten Vergleiche in der Tabelle 8-3 zeigen, dass entsprechende periodische Verläufe in den Messdaten in jedem Setup auftreten. Die Simulationsdaten weisen ebenfalls diese Periodizität auf. Es ist jedoch erkennbar, dass insbesondere auch hier die Messposition einen signifikanten Einfluss auf die Modellgüte hat.

Tabelle 8-3: Ergebnisse Modellvalidierung: Z-Falt-Stapelmaschine

Nr.	Grafischer Vergleich 	v_{Tisch} [mm/s]	$P_{Tänzer}$ [MPa]	Material	Messpo- sition	RMSE [N]	NRMSE [-]
1		75	0,2	Vlies	A	0.745	0.991
2		124	0,2	Vlies	A	0.563	0.560
3		143	0,2	Vlies	A	0.786	0.141
4		75	0,3	Vlies	A	0.699	0.621
5		124	0,3	Vlies	A	0.766	0.783
6		143	0,3	Vlies	A	0.800	0.401
7		143	0,2	Polymer	A	1.970	0.195

Nr.	Grafischer Vergleich 	v_{Tisch} [mm/s]	$P_{Tänzer}$ [MPa]	Material	Messpo- sition	RMSE [N]	NRMSE [-]
8		124	0,2	Polymer	A	0.695	0.628
9		75	0,2	Polymer	A	0.674	0.818
10		143	0,3	Polymer	A	2.449	1.227
11		124	0,3	Polymer	A	0.975	0.865
12		75	0,3	Polymer	A	0.874	0.836
13		75	0,2	Polymer	B	0.737	0.337
14		124	0,2	Polymer	B	0.801	0.268
15		143	0,2	Polymer	B	2.126	0.236
16		75	0,3	Polymer	B	0.875	0.434
17		124	0,3	Polymer	B	0.994	0.340

Nr.	Grafischer Vergleich 	v_{Tisch} [mm/s]	$P_{T\ddot{a}nzer}$ [MPa]	Material	Messpo- sition	RMSE [N]	NRMSE [-]
18		143	0,3	Polymer	B	2.678	0.328
19		143	0,2	Vlies	B	1.176	0.129
20		124	0,2	Vlies	B	0.662	0.229
21		75	0,2	Vlies	B	0.614	0.289
22		143	0,3	Vlies	B	1.197	0.146
23		124	0,3	Vlies	B	0.702	0.253
24		75	0,3	Vlies	B	0.606	0.297

Die Simulationsdaten, die zum Vergleich mit den Messdaten verwendet werden, welche an der Position A aufgenommen wurden, weisen grafisch im Vergleich mit den an Position B aufgenommenen Messdaten und den entsprechenden Simulationsdaten eine schlechtere Modellgüte auf. Insbesondere sind in den Simulationsdaten lokale Überhöhungen des Bahnzuges erkennbar, welche sich in den Messdaten nicht widerspiegeln. Es wird insgesamt im Mittel und im Vergleich ein erhöhter Bahnzug modelliert, als es die realen Messergebnisse zeigen. Tabelle 8-4 veranschaulicht die Mittelwerte der Kenngrößen RMSE und NRMSE in Abhängigkeit von den gewählten Parametern. Erkennbar ist, dass der Mittelwert des RMSE für eine mittlere Tischgeschwindigkeit von 143 mm/s im Vergleich mit 1,648 N am höchsten ausfällt. Bei der Betrachtung des

NRMSE weist der Fehler bei der Messposition B mit 0,672 den höchsten Wert auf. Diese Aussage deckt sich mit der Erkenntnis respektive Beobachtung, dass die Simulationsdaten im Vergleich die Messdaten an der Messposition A in ihrer Güte weniger genau abbilden als an der Messposition B. Die Gründe der Abweichung können auch hier vielfältig sein. So besteht die Möglichkeit, dass physikalische Effekte generell nicht betrachtet worden sind oder die Parametrierung entsprechender Teilmodelle unzureichend genau durchgeführt worden ist.

Tabelle 8-4: Auswirkungen gewählter Parameter auf die Modellgüte (Z-Falt-Stapelmaschine)

Parameter		RMSE-Mittelwert [N]	NRMSE-Mittelwert
$P_{T\ddot{a}nzer}$ [MPa]	0,2	0,962	0,402
	0,3	1,135	0,544
v_{Tisch} [mm/s]	75	0,728	0,578
	124	0,770	0,490
	143	1,648	0,350
Material	Vlies	0,776	0,403
	Polymer	1,321	0,542
Messposition	A	1,000	0,672
	B	1,097	0,274

Bei einer eventuell durchzuführenden Modelloptimierung bietet es sich in diesem Fall an, die Teilmodelle und deren Parametrierung an der Position A zu überarbeiten. So besteht z. B. die Möglichkeit, die Lagerreibwerte der Umlenkrollen an der Position A in dem Modell zu reduzieren bzw. iterativ anzupassen. Für die weiteren Betrachtungen wird die Modellgüte insgesamt als ausreichend angesehen, sodass die Anforderungen hinsichtlich der zeitlichen Bahnzugverläufe und der Größenordnung erfüllt sind. Grundlegende Schwankungen des Bahnzugs werden durch das Modell hinreichend genau abgebildet. Auftretende Belastungsspitzen fallen in den modellierten Datensätzen lokal höher aus. Diese Erkenntnisse sind bei der Anwendung des Modells durch den Nutzer zu berücksichtigen.

8.3 Zusammenfassung: Validierung der Modellgüte

Im Rahmen dieses Kapitels wurde die Güte der entwickelten Modelle für das flexible Vereinzelungsmodul und die Z-Falt-Stapelmaschine anhand gezielter Versuchsreihen ausgewertet und diskutiert. Hierdurch soll dem späteren Nutzer eine Einschätzung zur Verlässlichkeit der Modelldaten gegeben werden. Für die Versuche wurden entsprechende Einstellparameter an den Maschinen, jeweils zwei Materialsysteme und die

Messpositionen gemäß einer statistischen Versuchsplanung variiert. Für das flexible Vereinzelungsmodul wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan mit insgesamt 32 Setups und für die Z-Falt-Stapelmaschine ebenfalls ein vollfaktorieller Versuchsplan mit insgesamt 24 Setups durchgeführt. Die jeweiligen Versuchssetups wurden in den formulierten und parametrisierten Modellen ebenfalls umgesetzt. Zur Validierung wurde sowohl ein grafischer als auch ein objektiver Vergleich herangezogen. Beim grafischen Vergleich wurden die Mess- und Simulationsdaten hinsichtlich der Übereinstimmung charakteristischer Merkmale wie z. B. Periodizität und Extrema miteinander verglichen. Zusätzlich wurde ein objektiver Vergleich durchgeführt. Bei diesem wurden die statistischen Kenngrößen RMSE und NRMSE hinzugezogen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Modelle generelle Merkmale wie Periodizität und Extrema sowie Schwankungen des Bahnzugs hinreichend genau abbilden. Die Genauigkeit der Modellierung des Bahnzugs im Materialfluss der Anlage ist sowohl beim Modell des flexiblen Vereinzelungsmoduls als auch bei dem Modell der Z-Falt-Stapelmaschine im Bereich des Abwicklers am geringsten. Die Gründe hierfür können vielfältig sein. So besteht die Möglichkeit, dass gewisse Komponenten mit einem unzureichenden Detaillierungsgrad formalisiert worden sind oder eine unzureichend genaue Parametrierung stattgefunden hat. Mögliche Optimierungsansätze liegen in einer genaueren Modellierung des Materialcoils hinsichtlich auftretender Rundheitsabweichungen oder in einer genaueren Parametrierung von beispielsweise den Reibwerten der Rollenlager. Hierdurch ist eine Einschätzung über die entsprechenden Modellgenauigkeiten gegeben. Für das flexible Vereinzelungsmodul sind insbesondere die Schwankungen des Bahnzugs an dem Handhabungssystem wesentlich. Für die Z-Falt-Stapelmaschine ist vor allem der maximal auftretende Bahnzug in Abhängigkeit von den Einstell- und Maschinenparametern von hoher Relevanz. Die vorgestellten Modelle sind in der Lage, diese Effekte mit einer hinreichenden Genauigkeit abzubilden, und sie werden für die folgenden Betrachtungen weiterverwendet.

9 Anwendungsszenarien

Die Anwendungsszenarien der dargestellten Modelle sind vielfältig und diese können für unterschiedliche Szenarien in Bezug auf die in Kapitel 4.1 dargestellten Fälle verwendet werden. In diesem Kapitel werden verschiedene Szenarien aufgegriffen, welche in Bezug zu den dargestellten vier Anwendungsfällen stehen, und es werden die Potenziale der Modellierung der maschinenseitigen Einflüsse auf die jeweiligen Prozesse dargestellt. Zusätzlich wird die Erweiterung der Modelle um Teilmodelle für Bahnführungssysteme beschrieben. Hierdurch soll ein umfassender Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten gegeben und eine Inspirationsquelle für ähnliche Tätigkeiten geschaffen werden.

9.1 Anwendungsszenarien für das flexible Vereinzelungsmodul

Einer der kritischen Haupteinflussfaktoren auf qualitative Aspekte in einem Zellstapel sind die auftretenden Schwankungen respektive Streuungen im Bahnzug der Elektrode während des Vereinzelungsprozesses. Diese wirken sich unmittelbar in der geometrischen Maßhaltigkeit der vereinzelter Elektrodenblätter aus. Aus diesem Grund ist es von hoher Relevanz, den Bahnzug genau auf den entsprechenden Sollwert zu regeln. In den folgenden Ausarbeitungen werden Anwendungsfälle des Modells des flexiblen Vereinzelungsmoduls vorgestellt. Hierbei handelt es sich zum einen um die Ermittlung von Regelungsstrategien des Bahnzugs der Elektroden und zum anderen um die Ableitung von Prozessgrenzen.

9.1.1 Modellbasierte Ermittlung von Regelungsstrategien des Bahnzugs

Die Regelung des Bahnzuges lässt sich im Allgemeinen über verschiedene Wege realisieren. So besteht z. B. die Möglichkeit, eine aktive Regelung über entsprechende Tänzersysteme durchzuführen und die Abwicklung nach einem definierten Geschwindigkeitsprofil zu realisieren. Die aktive Regelung über die direkte Ansteuerung des Abwicklers ist ebenfalls eine Option. Diese Möglichkeiten können zunächst generell mittels Maschinenmodell ausgewertet werden. Vor dem Hintergrund der in Kapitel 4.1 definierten Anwendungsfälle kann dieses Szenario, die konkrete Entwicklung der Regelungsstrategie, dem Anwendungsfall 1 (AF1) zugeordnet werden. Der beschriebene Anwendungsfall wird in den Arbeiten von (Husseini et al. 2022a) untersucht. Vier verschiedene Methoden werden analysiert. Abbildung 9-1 veranschaulicht die hierbei be-

trachteten Methoden. Bei der Methode 1 wird der gemessene Bahnzug über den pneumatischen Zylinderdruck aktiv mittels PID-Element geregelt. Der Abwickler wird mit einer konstanten Soll-Geschwindigkeit angesteuert. Bei Methode 2 erfolgt die Regelung ebenfalls über die Ansteuerung des Pneumatikzylinders. Die Soll-Geschwindigkeit des Abwicklers wird so eingestellt, dass dessen Tangentialgeschwindigkeit der Tangentialgeschwindigkeit am Handhabungssystem entspricht.

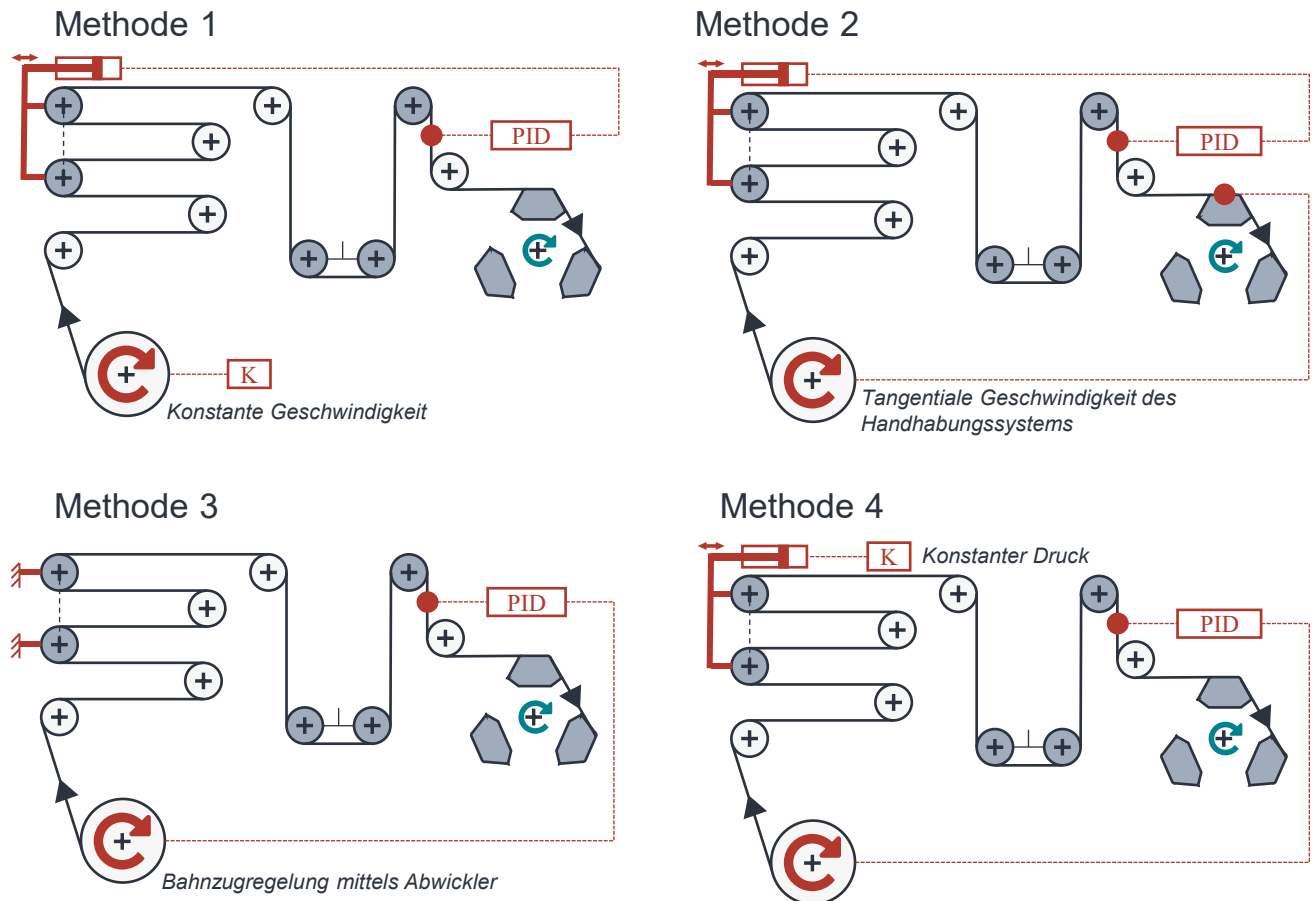


Abbildung 9-1: Vereinfachte Darstellung der Regelungsstrategien des Bahnzugs (in Anlehnung an (Husseini et al. 2022a))

Die aktive Regelung des Bahnzuges bei der Methode 3 erfolgt mittels Abwickler. Die Rollen des Materialspeichers sind bei dieser Methode mechanisch fixiert. Bei der Methode 4 wird der Bahnzug ebenfalls aktiv mithilfe des Abwicklers geregelt. Für die Untersuchungen wird ein zu regelnder Soll-Bahnzugwert $F_{Bahn,soll}$ von 15 N gewählt. Die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} beträgt 16 mm/s. Die zu vereinzelnde Elektrodenblattlänge L_{Sheet} beträgt 240 mm. Bei dem Material handelt es sich um eine Anode. Die Materialparameter sind der Tabelle 4-2 zu entnehmen. Die gewählten Verstärkungsfaktoren für alle vier dargestellten Methoden des PID-Reglers belaufen sich auf $K_P = 0,019$, $K_I =$

5,783 und $KD = 0$. Die Simulation des Bahnzugs erfolgt an der Position A. Auf Basis der hier aufgenommenen Messwerte geschieht ebenfalls die Regelung. Abbildung 9-2 veranschaulicht die Streuung der Bahnzugwerte über die Standardabweichung für die vier vorgestellten Methoden. Dargestellt ist jeweils die Standardabweichung, welche sich aus den gemessenen und den simulierten Datensätzen ergibt.

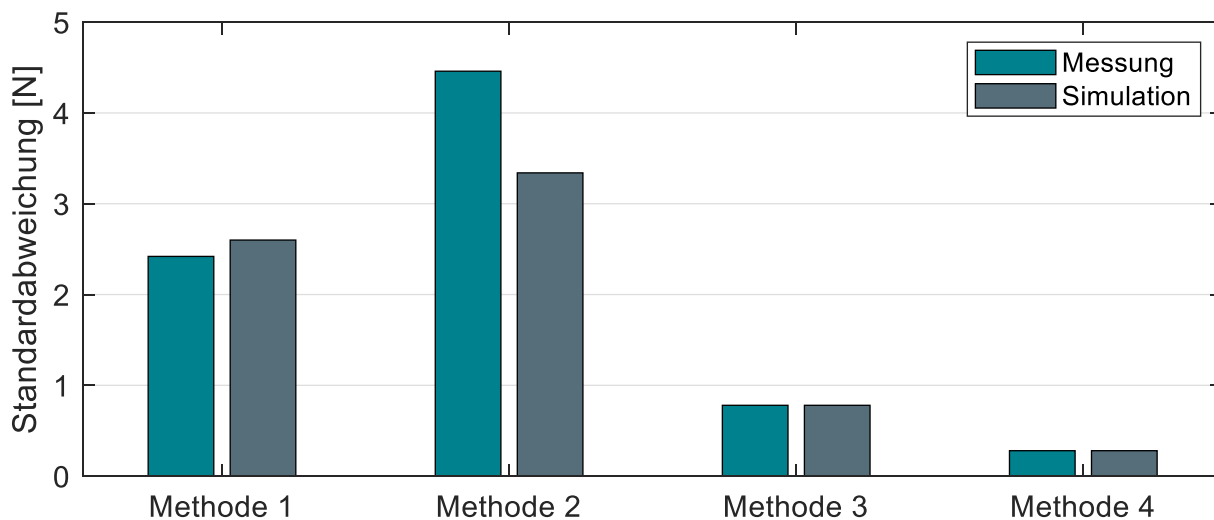


Abbildung 9-2: Standardabweichung der modellierten und gemessenen Bahnzugdaten (in Anlehnung an (Husseini et al. 2022a))

Zunächst wird festgehalten, dass die Ergebnisse bezüglich der Standardabweichung des digitalen Modells die Realität gut widerspiegeln, sodass ausreichende Rückschlüsse gezogen werden können. Die gemessenen Daten unterstreichen die modellbasierte Aussage, dass Methode 4 am besten geeignet ist. Sowohl die simulierten Daten als auch die gemessenen Datensätze zeigen hier die geringsten Abweichungen von dem Soll-Bahnzug. Folgendermaßen werden die Ergebnisse interpretiert: Die aktive Regelung des Bahnzugs über den Abwickler ermöglicht einen stabileren Bahnzugverlauf als die Regelung über den Materialspeicher als Lineartänzer. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Regelung nach Methode 2 wider Erwarten schlechter ist als die Regelung nach Methode 1. Ein möglicher Grund dafür ist der eintretende „Stick-Slip-Effekt“ im Pneumatikzylinder (Marton & Lantos 2007). Die Tatsache, dass für Methode 1 eine konstante Abwickelgeschwindigkeit gewählt wurde, führt dazu, dass sich der Pneumatikzylinder des Materialspeichers kontinuierlich in eine Richtung bewegt, wodurch sich die im System gespeicherte Materialmenge verringert. Dies ist notwendig, um die Geschwindigkeit des Abwicklers zu kompensieren, die geringfügig unter der Materialgeschwindigkeit des Handhabungssystems liegt. Aus diesem Grund ändert

sich die Bewegungsrichtung des Zylinders nicht. Die Haftreibung im Zylinder muss also nur einmal überwunden werden. Bei dieser Methode fährt der Materialspeicher jedoch nach einer gewissen Zeit an den mechanischen Endanschlag und sie ist daher für die praktische Umsetzung nicht geeignet. Bei der Methode 2 wird die Geschwindigkeit so gesteuert, dass ein an das Bewegungsprofil des Handhabungssystems angepasster Materialfluss über den Abwickler gewährleistet ist. Dies hat zur Folge, dass der Materialspeicher häufiger Richtungsumkehrungen unterliegt. Bei jeder Richtungsumkehr muss die entsprechende statische Haftreibung im Zylinder erneut überwunden werden. Die damit verbundenen „Stick-Slip-Effekte“ führen schließlich zu den bei der Methode 2 gezeigten Bahnspannungsschwankungen. Die Regelung der Bahnspannung nach Methode 3 führt dazu, dass das System deutlich instabiler ist als das von Methode 4. Bei Methode 3 ist der Materialspeicher fixiert. Es ist daher zu erkennen, dass der Abwickler viel empfindlicher auf Störungen reagiert. Bei der Methode 4 wird dies durch den Pneumatikzylinder des Materialspeichers ausgeglichen, der wie ein Feder-Dämpfer-Element wirkt.

9.1.2 Modellbasierte Analyse des Einflusses von Reglerparametern

Neben der allgemeinen Untersuchung und Überprüfung unterschiedlicher Regelungsstrategien ist ebenso die Möglichkeit gegeben, im Szenario einer Inbetriebnahme (AF2) eine Regloptimierung durchzuführen. Hierbei werden mittels Modell die Auswirkungen der Reglerparameter K_P , K_I , und K_D untersucht. Da die generelle Modellierung der Regelstrecke gegeben ist, können diverse Optimierungsmethoden wie z. B. die Ziegler-Nichols-Methode oder eine iterative Vorgehensweise angewandt werden (Patel 2020). Abbildung 9-3 veranschaulicht exemplarisch eine durchgeführte Optimierung für das flexible Vereinzelungsmodul. Betrachtet wird hier das Setup 16 des in Tabelle 8-1 dargestellten Versuchsplans. Zunächst sind hier die Simulations- und Messergebnisse mit den nicht optimierten Reglerparametern dargestellt. Diese sind ebenfalls zur Validierung der Modellgüte verwendet worden. Auf der linken Seite der Abbildung werden die entsprechenden zeitlich abhängigen Verläufe der Bahnzugschwankungen dargestellt. Auf der rechten Seite sind die jeweiligen Standardabweichungen visualisiert. Mittels einer iterativen respektive explorativen Vorgehensweise sind mithilfe des Modells des flexiblen Vereinzelungsmoduls optimierte Werte der Reglerparameter ermittelt worden. Hierbei zeigt sich, dass eine Senkung von K_P und eine Erhöhung von K_I zu einer

signifikanten Reduktion der Bahnzugswankungen und zu einem optimierten Erreichen des Soll-Bahnzugwertes von 10 N führen. Ein Hinzuziehen von KD verschlechtert das Regelergebnis. Die mittels Modell ermittelten, optimierten Reglerparameter von $KP = 0,035$, $KI = 0,309$ und $KD = 0$ führen ebenfalls in den Messungen zu einer erheblichen Reduktion der Bahnzugswankungen und zu einem generell verbesserten Erreichen des Soll-Bahnzugwertes.

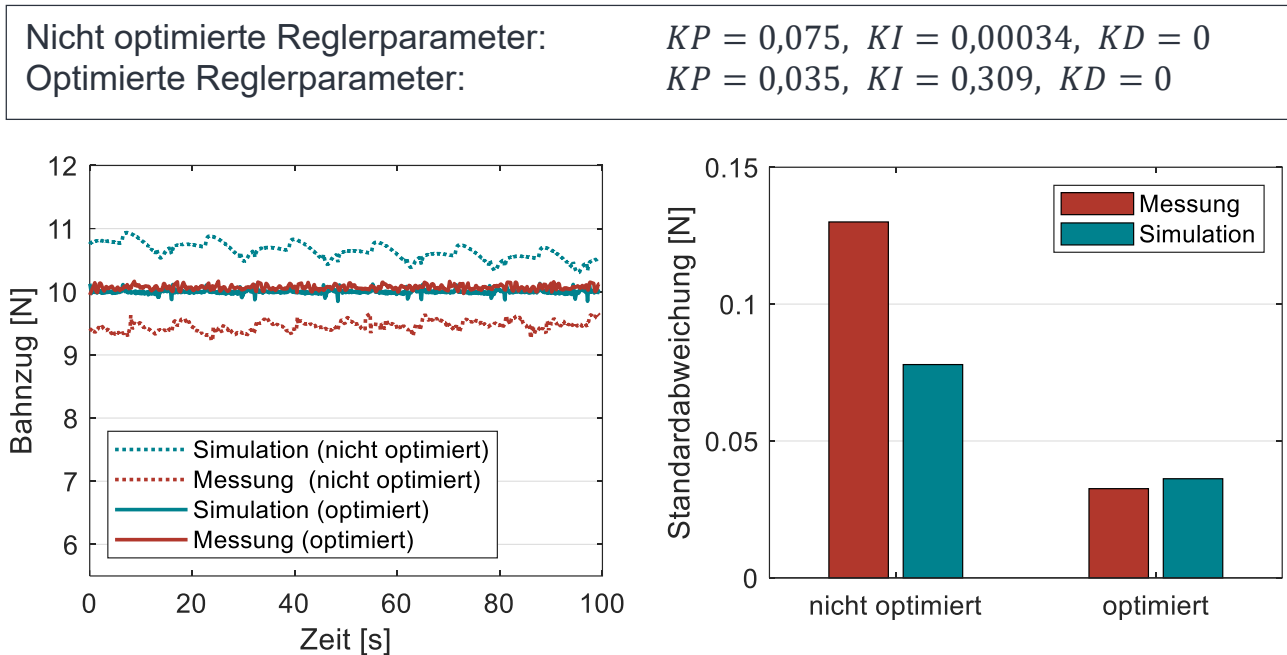


Abbildung 9-3: Simulation und Messung der Regleroptimierung

Ebenfalls erkennbar ist, dass sich die generelle Modellgüte bei den Daten mit optimierten Reglereinstellungen erhöht. Dies ist insbesondere dadurch zu begründen, dass der Effekt des nicht simulierten anfänglichen Bahnzuges durch das verbesserte Reglerverhalten ausgeglichen wird. Insgesamt soll hierdurch verdeutlicht werden, dass eine Ermittlung der Reglerparameter mittels Modell durchgeführt werden kann und es keiner Implementierung an der realen Maschine bedarf. Hierdurch bietet sich das Potenzial, auftretende Materialausschüsse während der Findung geeigneter Reglerparameter zu vermeiden. Zusätzlich ist festzuhalten, dass sich Auswirkungen einer veränderten Regelstrecke ebenfalls untersuchen lassen. So führt in diesem Fall eine Veränderung der zu vereinzeln Elektrodenblattlänge zu einem veränderten Maschinenverhalten. Das Modell des flexiblen Vereinzelnmoduls kann ebenfalls dazu genutzt werden, in Abhängigkeit von dem zu fertigenden Zellformat optimale Reglerparameter abzuleiten.

9.1.3 Modellierte Einflüsse der Elektroden

Im Folgenden werden entsprechende Szenarien vorgestellt, welche sich auf den zweiten Anwendungsfall (AF2) beziehen, die Inbetriebnahme respektive den Einrichtungprozess der Maschine. Ein mögliches Szenario besteht in einem beispielhaften Wechsel des Elektrodenmaterials. Die hauptsächlichen Einflussparameter, welche den Teilmodellen der Materialbahn und der Umlenkrollen zugrunde liegen, beziehen sich vornehmlich auf den E-Modul, Querschnittsfläche und Reibungswerte zwischen Material und Rollenoberfläche. Diese bewirken schlussendlich einen Unterschied in den Bahnzugverläufen. Abbildung 9-4 veranschaulicht den simulierten Einfluss unterschiedlicher Elektroden auf die Bahnzugschwankungen.

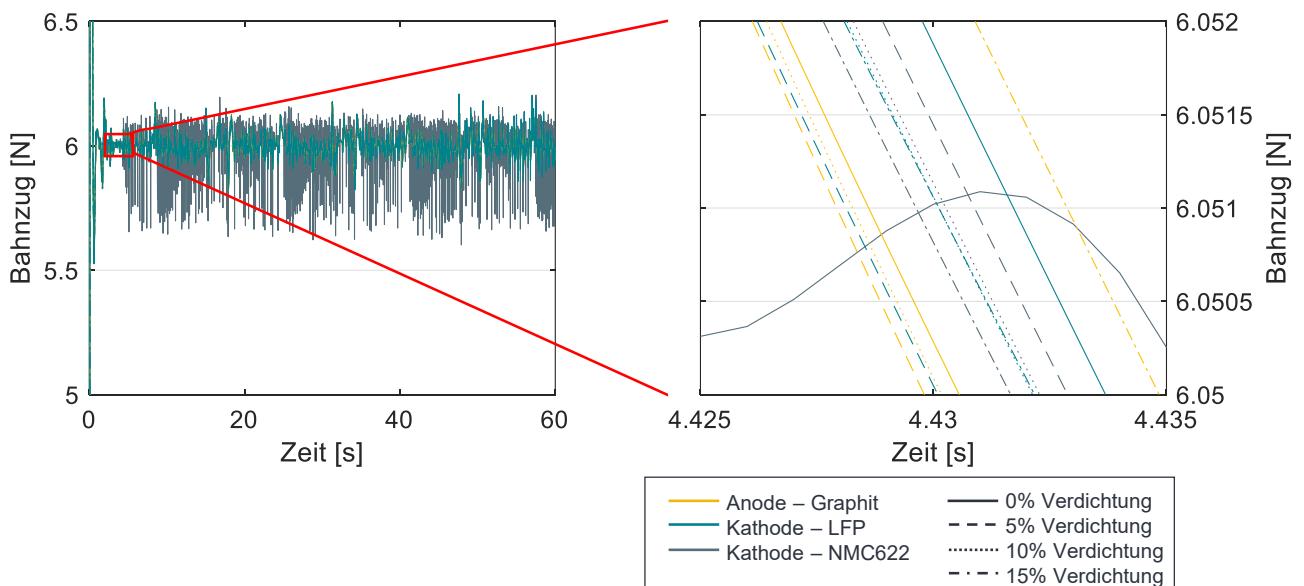


Abbildung 9-4: Simulierter Bahnzug in Abhängigkeit von verschiedenen Elektroden

Die für die Simulation verwendeten Materialkennwerte beziehen sich auf die in Kapitel 7.2.1 vorgestellten Materialsysteme. Hinsichtlich der gewählten Maschinenparameter umfasst das hier gewählte Setup eine Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} von 16 mm/s, einen zu regelnden Soll-Bahnzugwert $F_{Bahn,soll}$ von 6 N und eine zu vereinzelnde Elektrodenblattlänge L_{Sheet} von 260 mm. Für die Simulation sind die optimierten Reglerparameter des vorherigen Kapitels verwendet worden. Die Simulation selbst ist in diesem Fall mit einer diskreten Schrittweite von 0,001 s durchgeführt worden. Hierdurch sollen etwaige Unterschiede in den Bahnzugverläufen besser dargestellt werden. Die linke Seite der Abbildung zeigt die auftretenden Bahnzugverläufe. Auf der rechten Seite der

Abbildung wird ein Ausschnitt eines ausgewählten Bereiches dargestellt. Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass sich die Auswirkungen der verschiedenen Elektroden auf die Bahnzugschwankungen, mit Ausnahme des unkalandrierten bzw. des nicht verdichteten NMC-622-Kathodenmaterials, nur geringfügig unterscheiden. Die NMC-622-Kathode mit 0 % Verdichtung spiegelt sich in einem generell anderen Bahnzugverlauf mit einer höheren Schwankungsbreite wider. Einer der möglichen Gründe hierfür liegt ggf. in einem vergleichsweise höheren E-Modul und gleichzeitig in einem höheren statischen und dynamischen Reibungskoeffizienten (vgl. Abbildung 7-7 und Tabelle 7-5). Insbesondere bei einem erhöhten statischen Haftreibungskoeffizienten bewirken Beschleunigungsprozesse der Materialbahnen, aufgrund der Trägheitsmomente der Umlenkrollen, signifikante Steigerungen der Belastungsspitzen innerhalb der Materialbahnen. Der erhöhte E-Modul bewirkt ebenfalls eine Erhöhung der Eigenfrequenz. Es besteht zudem die Möglichkeit, dass sich die auftretenden Schwingungen des modellierten Gesamtsystems der Eigenfrequenz der Materialbahn annähern und es daher zu einer erhöhten Schwankungsbreite in den modellierten Bahnzugverläufen kommt. Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass im Rahmen des gewählten Setups die materialseitigen Einflüsse auf die Bahnzugschwankungen gering ausfallen. Die niedrigen Geschwindigkeiten und die kontinuierliche Materialverarbeitung im Vergleich zum herkömmlichen Z-Falt-Stapelprozess führen zu geringen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen des Materials. Dies bewirkt, dass sich die unterschiedlichen Reibungskoeffizienten der Elektroden kaum auf die auftretenden Bahnzugschwankungen auswirken. Grundsätzlich soll hierdurch gezeigt werden, dass der Einfluss der Materialien auf die Bahnzugschwankungen vor der eigentlichen realen Umsetzung mit dem Modell risikolos überprüft werden kann. Somit können im Vorfeld entsprechende Auswirkungen analysiert und Aussagen zur Verarbeitbarkeit getroffen werden.

9.1.4 Modellierte Einflüsse der Einstellparameter

Die Einstellparameter, welche der Anlagenbediener variieren kann, beeinflussen die Schwankungen im Bahnzug. Im Folgenden werden entsprechende Simulationsstudien aufgezeigt, welche sich auf den zweiten Anwendungsfall (AF2) beziehen. Hierbei werden für einen vermeintlichen Inbetriebnahme-/Einrichtprozess entsprechende Auswirkungen der Einstellparameter der Maschine auf die Schwankungen im Bahnzug simu-

lativ untersucht. In erster Linie sollen dem Betreiber mögliche Prozessgrenzen aufgezeigt und dem Maschinenbediener Anhaltspunkte zur Parameterwahl vermittelt werden.

Anschließend wird der Einfluss der einstellbaren Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} und des zu regelnden Soll-Bahnzugs $F_{Bahn,soll}$ auf die Bahnzugschwankungen simulativ untersucht. Hierbei wird ebenfalls als Maß der Schwankungen die Standardabweichung der simulierten Werte herangezogen. Die Simulationsstudien werden iterativ durchgeführt, indem die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} zwischen 5 mm/s und 50 mm/s in Schritten von 0,5 mm/s und der zu regelnde Soll-Bahnzug $F_{Bahn,soll}$ zwischen 3 N und 16 N in Schritten von 0,5 N variiert werden. Die gewählte zu vereinzelnde Elektrodenblattlänge L_{Sheet} beträgt 260 mm und wird für diese Studien nicht variiert. Das gewählte Materialsystem bezieht sich auf das LFP-Kathodenmaterial mit einer Verdichtung von 15 %. Für die Studien werden die optimierten Reglerparameter aus Kapitel 9.1.2 verwendet. Der simulierte Maschinenbetrieb beträgt 100 s. Die gewählte Schrittweite beläuft sich auf 0.1 s. Insgesamt ergeben sich hieraus 2 457 Simulationsdurchläufe. Für das Einrichten, Starten und Verarbeiten der Ergebnisdaten wird ein mit *Matlab* erstelltes Skript verwendet. Dieses greift auf das Softwaretool *Simcenter Amesim* zu und startet automatisiert die Simulationsdurchläufe. Abbildung 9-5 veranschaulicht die Ergebnisse der Simulationsstudien. Aus der Abbildung kann zunächst abgeleitet werden, dass der zu regelnde Soll-Bahnzug $F_{Bahn,soll}$ innerhalb des betrachteten Bereiches keinen signifikanten Einfluss auf die Bahnzugschwankungen hat. Dies wird insbesondere in der unteren linken Teilabbildung verdeutlicht. Hieraus kann abgeleitet werden, dass bei einem Einrichten der Maschine der zu regelnde Soll-Bahnzug bei einer beispielsweise unzureichenden Zwischenproduktqualität, nämlich vereinzelte Elektrodenblätter mit zu hohen Streuungen in der Maßhaltigkeit, nicht den geeigneten Stellhebel für eine Optimierung darstellt. Vielmehr sollte hier der für das Material optimale Soll-Bahnzug verwendet werden. Der hauptsächliche Einfluss auf die Schwankungen liegt in der einstellbaren Bahngeschwindigkeit. Hierbei ist erkennbar, dass zunächst eine Erhöhung der Bahngeschwindigkeit zu geringeren Bahnzugschwankungen führt. Die minimale Standardabweichung beträgt 0,0308 N und ist konkret bei einer Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} von 16 mm/s und einem zu regelnden Soll-Bahnzug $F_{Bahn,soll}$ von 12,5 N zu verzeichnen. Bei einer weiteren Erhöhung der Bahngeschwindigkeit steigen die Standardabweichung respektive die Schwankung im Bahnzug weiter an. Generell ist an dieser Stelle festzuhalten, dass das prototypische flexible Vereinzelungsmodul mechanisch in der Geschwindigkeit bis

zu 24 mm/s limitiert ist. Dennoch können die Ergebnisse bei einer etwaigen Hochskalierung des Maschinenkonzeptes in Bezug auf den Durchsatz darüber Aufschluss geben, wie sich bei weiter ansteigenden Geschwindigkeiten die Schwankungen des Bahnzugs in den Elektrodenbahnen verhalten werden. Damit kann beispielsweise anschließend eine Abschätzung erfolgen, ab welchem Punkt eine erneute Optimierung der Reglerparameter durchgeführt werden sollte.

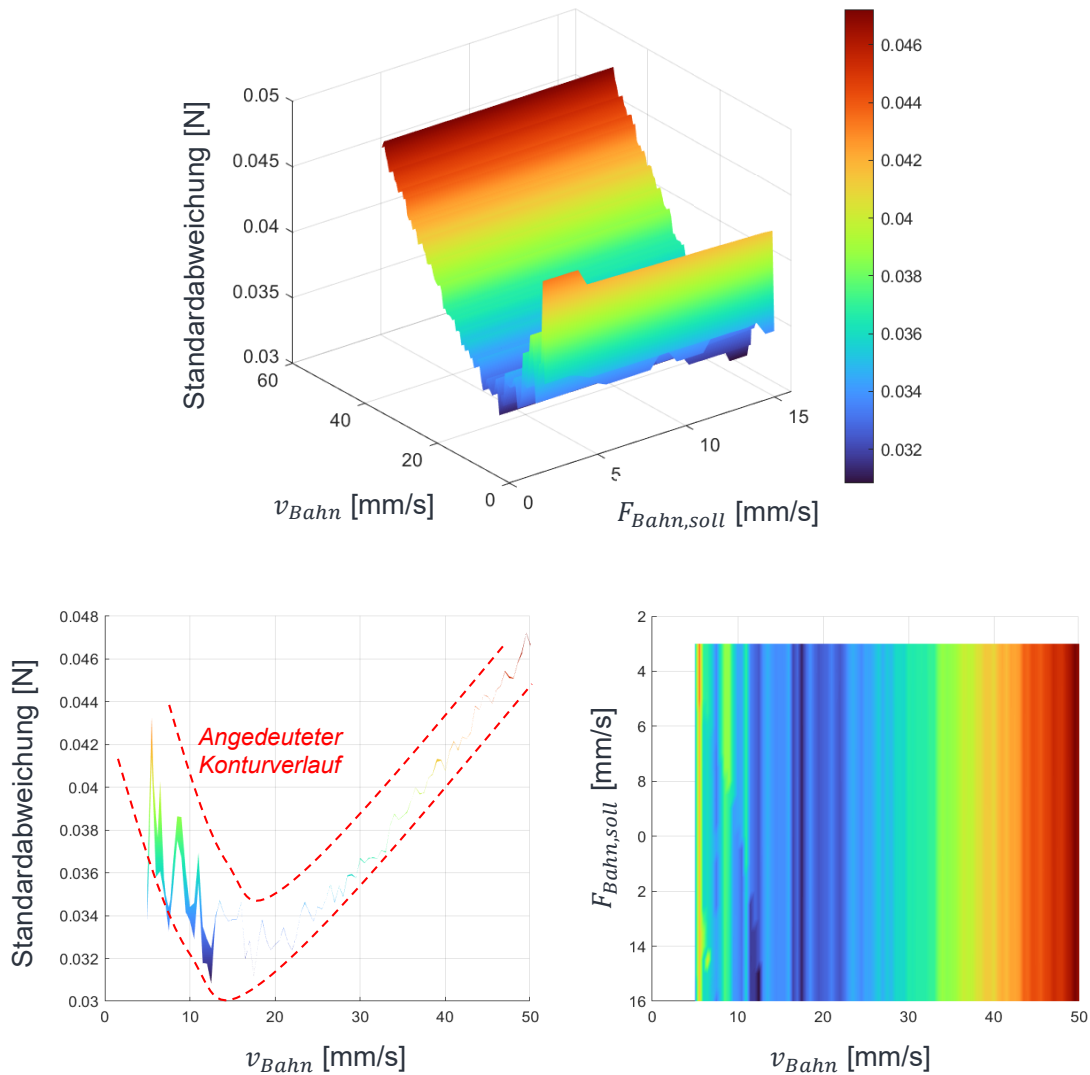


Abbildung 9-5: Modellierte Einflüsse der Bahngeschwindigkeit und des Soll-Bahnzugs auf die Bahnzugsschwankungen

In den nachfolgenden Ausarbeitungen wird eine weitere Simulationsstudie vorgestellt, in der die Auswirkungen der Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} in Kombination mit der zu ver-
einzelnden Elektrodenblattlänge L_{Sheet} auf die Bahnzugsschwankungen untersucht werden. Für diese Simulationsstudien wird ebenfalls die Bahngeschwindigkeit zwischen

5 mm/s und 50 mm/s in Schritten von 0,5 mm/s variiert. Die zu vereinzelnde Elektrodenblattlänge wird zwischen 100 mm und 300 mm in Schritten von 5 mm variiert. Der zu regelnde Soll-Bahnzug beträgt 10 N und verbleibt für die Simulationsstudien konstant. Hieraus ergibt sich eine Gesamtanzahl von 3 731 Simulationsdurchläufen. Diese werden ebenfalls mittels Skript automatisch durchgeführt.

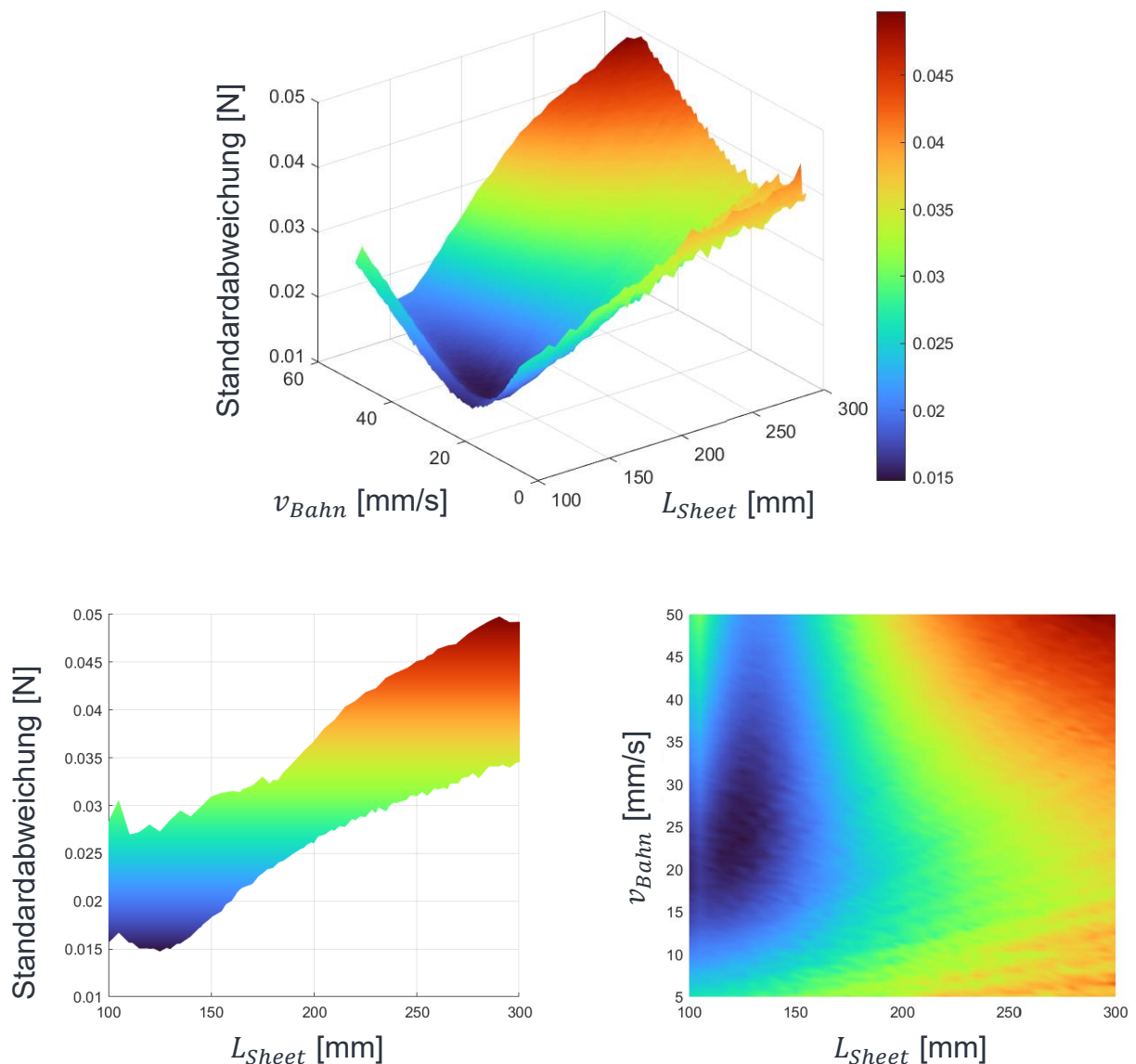


Abbildung 9-6: Modellerte Einflüsse der Bahngeschwindigkeit und der Elektrodenblattlänge auf die Bahnzugschwankungen

Die Dauer des simulierten Maschinenbetriebs beträgt 100 s und die Schrittweite 0,1 s. Es werden ebenfalls die entsprechenden Parameter des LFP-Kathodenmaterials mit einem Verdichtungsgrad von 15 % verwendet. Abbildung 9-6 veranschaulicht die Er-

gebnisse dieser Simulationsstudie. Es ist erkennbar, dass sowohl die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} als auch die zu vereinzelnende Elektrodenblattlänge L_{Sheet} einen vergleichsweise signifikanten Einfluss auf die Bahnzugschwankungen haben. Der minimale Betrag der Standardabweichung beträgt 0,0147 N bei einer Bahngeschwindigkeit von 23,5 mm/s und einer zu vereinzelnenden Elektrodenblattlänge von 125 mm. Es wird ersichtlich, dass ein Anstieg der Bahngeschwindigkeit zunächst zu einer tendenziellen Verringerung der Standardabweichung des Bahnzugs führt. Ab dem genannten Schwellenwert von 23,5 mm/s erhöht sich die Standardabweichung des Bahnzugs mit zunehmender Bahngeschwindigkeit. Dies ist für alle Elektrodenblattlängen beobachtbar. Weiterhin kann festgestellt werden, dass eine Erhöhung der zu vereinzelnenden Elektrodenblattlänge anfänglich zu einer Reduktion der Standardabweichung respektive Streuung führt. Ab einer Elektrodenblattlänge von etwa 125 mm beginnt die Standardabweichung des Bahnzugs zu steigen und nimmt weiter zu, wenn das zu vereinzelnende Elektrodenblatt länger wird. Generell ist festzuhalten, dass das Verhalten insbesondere durch die Auslegung des Reglers bestimmt wird. Es kann nicht pauschal festgehalten werden, dass eine Erhöhung der Bahngeschwindigkeit und der zu vereinzelnenden Elektrodenblattlänge zu einer Steigerung der Standardabweichung des Bahnzugs führt. Vielmehr ist entscheidend, auf welchen Betriebspunkt der Regler ausgelegt wird.

Die dargestellten Simulationsstudien sollen einen generellen Überblick über die Einflüsse der Einstellparameter des flexiblen Vereinzelungsmoduls vermitteln und Stellhebel zur Optimierung aufzeigen. Insgesamt kann mit diesem Vorgehen abgeschätzt werden, bis zu welchem Bereich die Schwankungen tolerabel sind für ein bestimmtes Material oder ein bestimmtes Zellformat. Die Ermittlung der konkreten, absoluten Auswirkungen der Schwankungen im Bahnzug auf die geometrische Maßhaltigkeit der vereinzelnenden Elektrodenblätter erfordert ein entsprechendes tiefgreifendes Materialverständnis, welches in Bezug zu dem dargestellten Maschinenmodell gebracht werden muss. Sofern die Toleranzgrenze überschritten wird, besteht erneut die Möglichkeit, Optimierungen durch z. B. eine erneute Anpassung der Reglerparameter modellbasiert zu erschließen und risikolos zu testen.

9.2 Anwendungsszenarien für die Z-Falt-Stapelmaschine

Im nächsten Schritt werden verschiedene Anwendungsszenarien des Modells der Z-Falt-Stapelmaschine dargestellt. Es werden ebenfalls zunächst die modellierten Einflüsse der beiden Separatormaterialien gegenübergestellt und analysiert. Anschließend

erfolgt die Modellierung der Einflüsse der Einstellparameter auf die mechanische Belastung des Separators.

9.2.1 Modellierte Einflüsse der Separatoren

Es wird nun der modellierte Einfluss der Separatoren auf den auftretenden Bahnzug in den jeweiligen Materialien untersucht. Für die Untersuchungen werden eine mittlere Tischgeschwindigkeit v_{Tisch} von 143 mm/s und ein pneumatischer Zylinderdruck des Tänzers $P_{Tänzer}$ von 0,2 MPa eingestellt. Die Dauer des simulierten Maschinenbetriebs beträgt 30 s mit einer diskreten Schrittweite von 0,001 s. Für die Untersuchungen werden die in Kapitel 7.2.1.2 ermittelten Kennwerte für den Polymer- und Vliesstoff-Separator verwendet. Abbildung 9-7 veranschaulicht die Bahnzugverläufe der betrachteten Separatormaterialien.

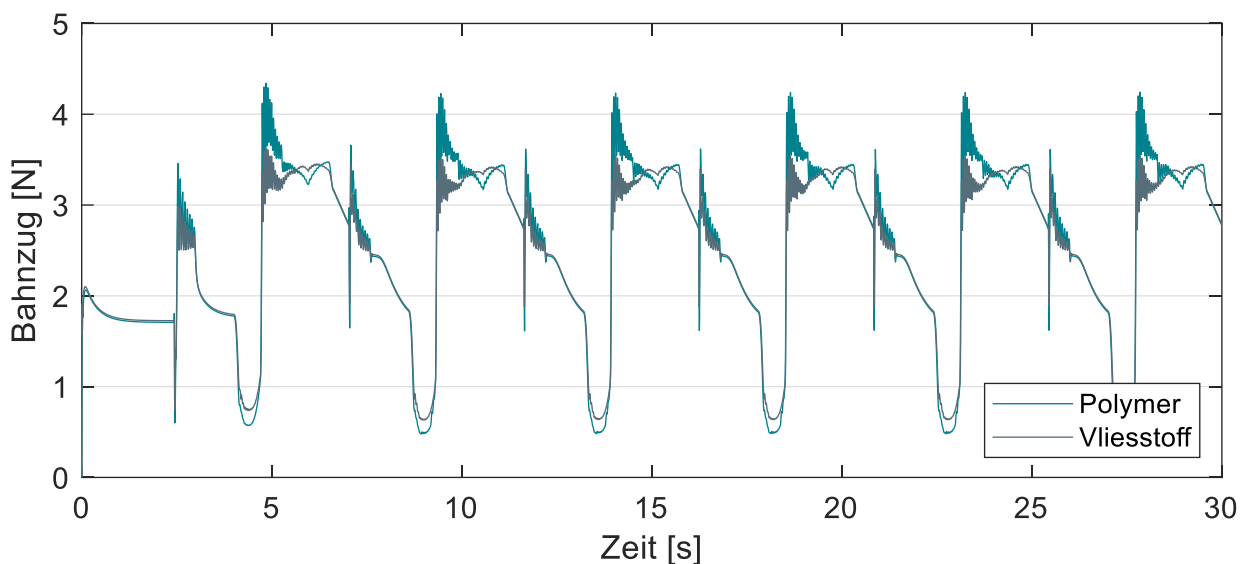


Abbildung 9-7: Simulierter Bahnzug in Abhängigkeit von verschiedenen Separatoren

Anhand der Abbildung ist deutlich erkennbar, dass sich die beiden Verläufe in dem dargestellten Bereich voneinander unterscheiden. Außerdem fällt die Schwankungsbreite bei dem Polymerseparator generell höher aus als bei dem Vliesstoff-Separator. Dies bedeutet, dass der minimale Bahnzug des Polymerseparators geringer und der maximale Bahnzug höher als bei dem Vliesstoff-Separator ist. Die generelle Charakteristik in Bezug auf Periodizität und Lage der Extremwerte unterscheidet sich nur geringfügig. Das Z-Falten ist im Allgemeinen durch eine diskrete „Pick and Place“-Prozessführung gekennzeichnet. Somit kommt es zu einem Beschleunigen und einem Abbremsen.

sen des Stapeltisches. Hierdurch werden schließlich entsprechende Bahnzugschwankungen induziert. Die Unterschiede in den Zugverläufen der Bahnmaterialien resultieren hauptsächlich aus den verschiedenen Reibwerten zwischen den Materialien und der Oberfläche der Rollen. Da die Umlenkrollen eine gewisse Trägheit mit sich bringen, findet während der Beschleunigungsvorgänge eine Relativbewegung zwischen Material- und Rollenoberfläche statt. Der dynamische Gleitreibungskoeffizient des Polymerseparators ist höher als der des Vliesstoff-Separators, was sich schließlich in erhöhten Spannungsspitzen im Polymerseparator bemerkbar macht.

9.2.2 Modellierte Einflüsse der Einstellparameter

In der folgenden Simulationsstudie werden die Einflüsse der Einstellparameter der Z-Falt-Stapelmaschine auf die Materialbelastung dargestellt und diskutiert. Für die Studie wird der Fokus auf den maximal auftretenden Bahnzug $F_{Bahn,max}$ in Abhängigkeit von den Einstellparametern der mittleren Tischgeschwindigkeit v_{Tisch} und dem Zylinderdruck am Tänzersystem $P_{Tänzer}$ gelegt. Der maximal auftretende Bahnzug gilt insbesondere als kritisch, weil er eine Materialbeschädigung verursachen kann, die sich als Bahnriß oder in einer plastischen Verformung des Separators niederschlägt. Die durchgeführte Simulationsstudie ist ebenfalls dem zweiten Anwendungsfall (AF2) zuzuordnen. Hierdurch soll für eine etwaige Inbetriebnahme oder einen Einrichtprozeß bei Materialwechsel ein Überblick über die Auswirkungen der Einstellparameter der Z-Falt-Stapelmaschine gegeben werden. Die Position des simulierten Bahnzugs entspricht der Position B (vgl. Abbildung 8-3). Für die Studie wird die mittlere Tischgeschwindigkeit v_{Tisch} zwischen 10 mm/s und 300 mm/s mit einer Schrittweite von 5 mm/s variiert. Der Druck am Pneumatikzylinder des Tänzers wird zwischen 0,1 MPa und 1 MPa mit einer Schrittweite von 0,01 MPa variiert. Hierdurch ergibt sich eine Gesamtzahl von 5 369 Simulationsdurchläufen. Diese werden ebenfalls mit einem *Matlab*-Skript automatisiert durchgeführt. Die diskrete Schrittweite der Simulation beträgt 0,1 Sekunden. Es wird jeweils ein Maschinenbetrieb von 30 Sekunden simuliert. Die hierbei verwendeten Materialparameter beziehen sich auf den Vliesstoff-Separator (vgl. Kapitel 7.2.1.2). Abbildung 9-8 veranschaulicht die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsstudie.

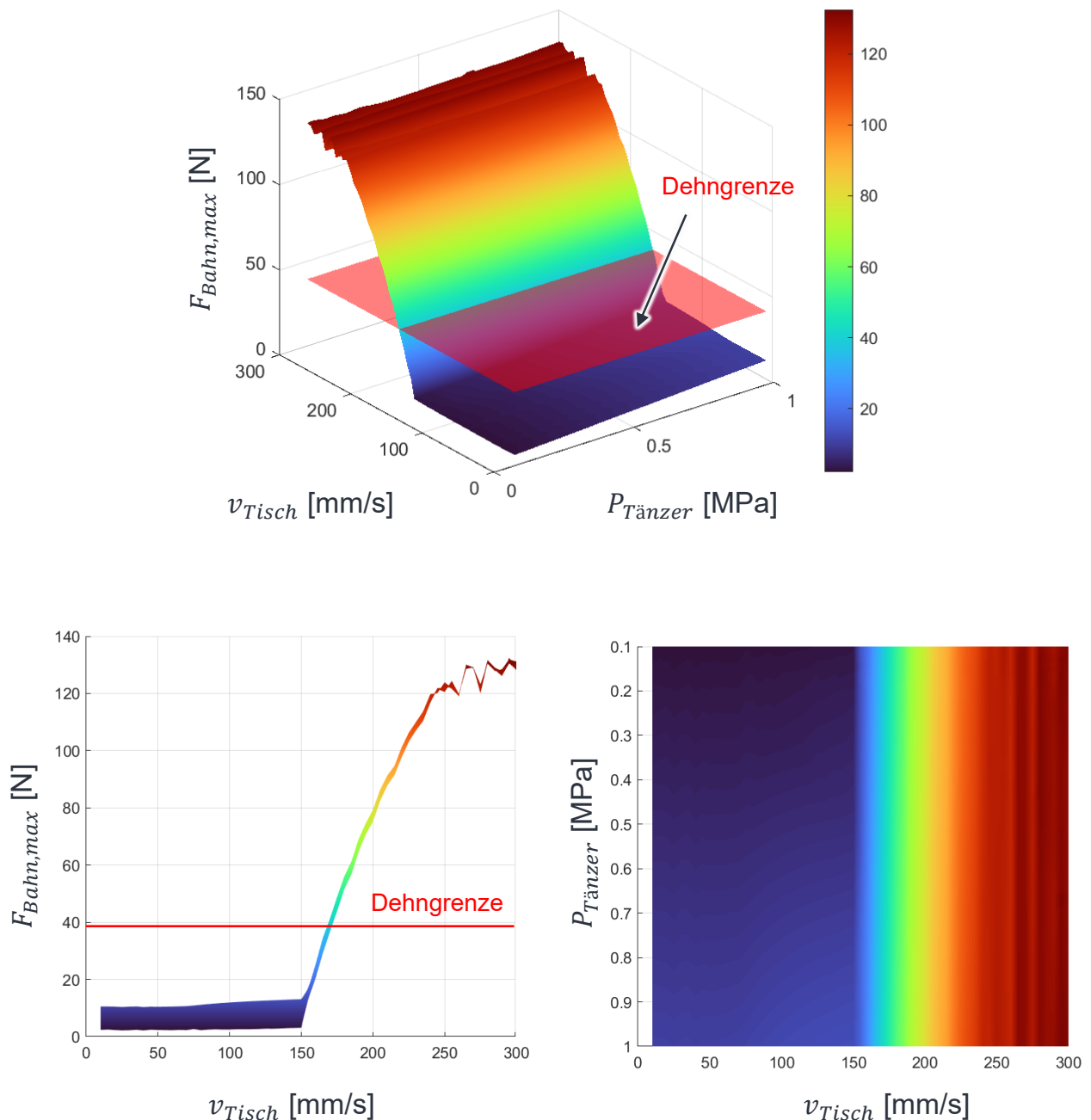


Abbildung 9-8: Modellierte Einflüsse der mittleren Tischgeschwindigkeit und des Zylinderdrucks auf den maximalen Bahnzug

Hierbei ist erkennbar, dass es ab einer mittleren Tischgeschwindigkeit v_{Tisch} von ca. 150 mm/s zu einem signifikanten Anstieg des maximal auftretenden Bahnzuges kommt. Bis zu diesem Schwellenwert hat der pneumatische Zylinderdruck im Tänzer $P_{Tänzer}$ einen erhöhten Einfluss auf den maximalen Bahnzug. Der Grund für diesen starken Anstieg des maximalen Bahnzuges liegt darin, dass der Tänzer seinen mechanischen Anschlag erreicht, bevor genügend Material von dem Abwickler in den Prozess geführt

wird und der Stapeltisch seine Endposition erreicht hat. Abbildung 9-9 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der Winkelposition des Tänzers und dem auftretenden Bahnzug bei unterschiedlichen mittleren Tischgeschwindigkeiten. Der gewählte Druck im Pneumatikzylinder des Tänzers beträgt 0,2 MPa.

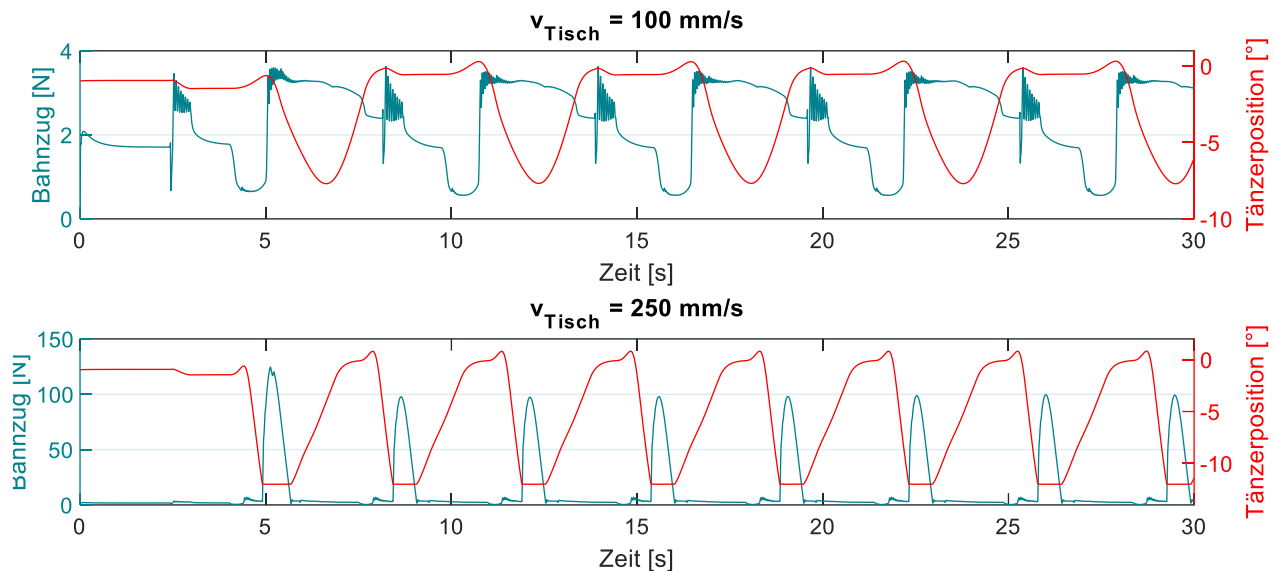


Abbildung 9-9: Zusammenhang zwischen Bahnzug und Tänzerposition

Der mechanische Anschlag wird durch den maximalen Hub im Pneumatikzylinder bestimmt. Für die Winkelposition bedeutet dies, dass die rotatorischen Endanschläge für den Tänzer bei 35° und -12° liegen. Die Abbildung verdeutlicht, dass bei einer mittleren Tischgeschwindigkeit v_{Tisch} von 100 mm/s die Endanschläge nicht erreicht werden. Bei 250 mm/s erreicht der Tänzer seinen Endanschlag von -12° . Ebenfalls erkennbar ist, dass sich die entsprechenden Spitzen des Bahnzugs in den Bereichen befinden, in denen der Tänzer den Endanschlag erreicht. Hierdurch kann insgesamt abgeleitet werden, dass eine generelle konstruktiv bedingte Prozessgrenze bei 150 mm/s liegt. Maßnahmen zur Optimierung bestehen hier z. B. in der Erhöhung der rotatorischen Bewegungsfreiheit des Tänzers oder in einem schnelleren Reagieren des Abwicklers. Zusätzlich ist in der Abbildung 9-8 die Dehngrenze des Vliesstoff-Separators dargestellt. Generell kann festgehalten werden, dass diese bei einer mittleren Tischgeschwindigkeit von ca. 170 mm/s überschritten wird und es darüber hinaus zu einer geringfügigen plastischen Verformung und anschließend einem Bahnriss kommen wird. In der Praxis tritt eine Beschädigung des Separators aufgrund einer inhomogenen Spannungsverteilung vermutlich schon bei geringeren Bahnzügen auf. Insbesondere sind Spannungsspitzen an den Positionen der Klemmfinger zu erwarten. An dieser Stelle können die

dargestellten Erkenntnisse z. B. mit Modellen zur tiefgreifenden Simulation des Materialverhaltens gekoppelt werden.

9.3 Bahnführungssysteme: Modellerweiterung und Anwendung

Zusätzlich zu den dargestellten Simulationsstudien und Optimierungsansätzen soll im Rahmen dieses Kapitels als Teil der Anwendungsmöglichkeiten exemplarisch die Modellerweiterung um entsprechende Bahnführungssysteme dargestellt werden. Da Ungenauigkeiten in der Bahnführung nach den in Kapitel 4.2.2.1 herausgestellten Fehlerursachen die Qualität eines Zellstapels beeinflussen, ist es als sinnvoll zu erachten, ebenfalls die Einflüsse von den Bahnführungssystemen auf die Prozesse zu modellieren. Die entsprechenden Ergebnisse wurden im Rahmen von (A_Gupta 2024) erarbeitet und werden in (Husseini et al. 2024a) präsentiert. Abbildung 9-10 veranschaulicht die Funktionsweise des Drehrahmen-Bahnkantenregelungssystems.

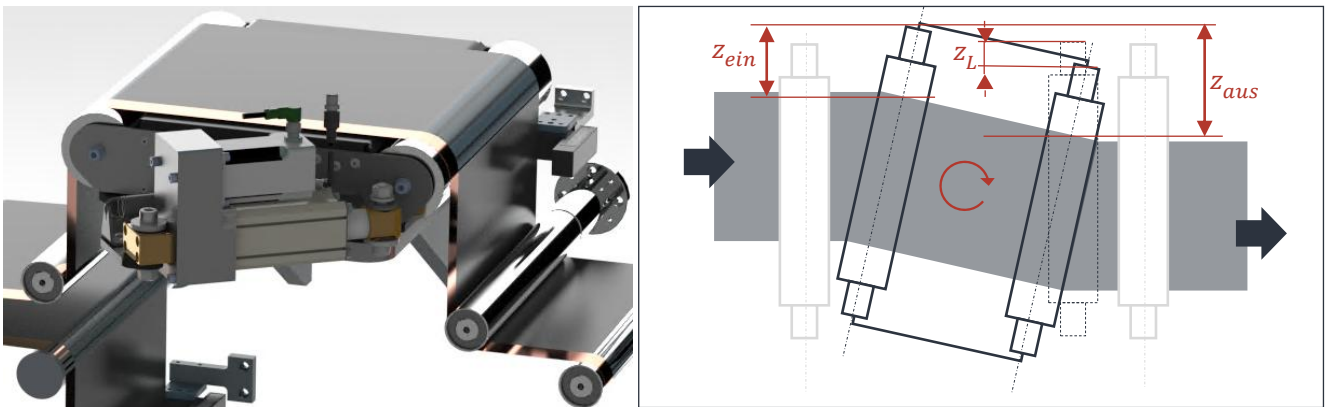


Abbildung 9-10: Bahnkantenregelung mittels Drehrahmen (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))

Der Drehrahmen besteht aus einem Rollenpaar, dessen Position durch einen Stellantrieb rotatorisch angepasst wird. Dieser Mechanismus dient dazu, Ungenauigkeiten im Geradlauf der Bahn zu korrigieren. Die wesentlichen Größen sind dabei die laterale Verschiebung der einlaufenden Bahnkante z_{ein} , die laterale Verschiebung der auslaufenden Bahnkante z_{aus} und der Verstellweg z_L . Die Modellierung dieser Systeme wird in (Seshadri & Pagilla 2010) beschrieben. Um einen Überblick zu geben, wird die in Gleichung (9-1) dargestellte Korrelation verwendet. Die Berechnung findet im Laplace-Bereich statt, wird aber in der nachfolgenden Ergebnisbeschreibung in den Zeitbereich übertragen. Eine detaillierte Erläuterung der einzelnen Variablen und Funktionen ist den Arbeiten von (Seshadri & Pagilla 2010) zu entnehmen.

$$z_{aus}(s) = \frac{-\frac{1}{\tau_0}f_3(KL_0)s + \frac{1}{\tau_0^2}f_1(KL_0)}{s^2 + \frac{1}{\tau_0}f_2(KL_0)s + \frac{1}{\tau_0^2}f_1(KL_0)} \times \left(\frac{-\frac{1}{\tau}f_3(KL)s + \frac{1}{\tau^2}f_1(KL)}{s^2 + \frac{1}{\tau}f_2(KL)s + \frac{1}{\tau^2}f_1(KL)} \right) z_{ein}(s) + \frac{s^2 + \frac{1}{\tau}f_2(KL)s + \frac{1}{\tau^2}f_1(KL)}{s^2 + \frac{1}{\tau}f_2(KL)s + \frac{1}{\tau^2}f_1(KL)} z_L(s) \quad 9-1$$

An dieser Stelle werden jedoch die wichtigsten Parameter dieses Zusammenhangs beschrieben. Gleichung (9-2) zeigt die Berechnung des Spannweitenparameters K und Gleichung (9-3) zeigt die Bestimmung der Zeitkonstante τ .

$$K = \sqrt{\frac{F_{Bahn}}{E * I}} \quad 9-2$$

$$\tau = \frac{L}{v_{Bahn}} \quad 9-3$$

Dabei beschreibt F_{Bahn} den auftretenden Bahnzug zwischen den Walzen des Drehrahmens, E den Elastizitätsmodul des Bahnmaterials, I das Flächenträgheitsmoment der Bahn, L ist die Spannweite der Bahn zwischen den Walzen und v_{Bahn} ist die aktuelle Bahngeschwindigkeit. Über den auftretenden Bahnzug und die Bahngeschwindigkeit kann eine Kopplung zu den bisherigen Gesamtmaschinenmodellen erfolgen. Abbildung 9-11 veranschaulicht die Schnittstellen und die Kopplung des Modells des Drehrahmens. Hierbei können z. B. an den Positionen, an denen im System ein Drehrahmen verbaut ist, die Bahngeschwindigkeit und der Bahnzug als Eingangsgröße für das Modell des Drehrahmens verwendet werden. Des Weiteren wird ein zeitabhängiger Referenzdatensatz der einlaufenden Bahnkante z_{ein} an das Modell des Drehrahmens übergeben. Hierbei kann ein gemessener oder synthetisch generierter Datensatz verwendet werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, das Verhalten des Drehrahmens bzw. des Bahnkantenregelungssystems in Abhängigkeit von Einstellparametern der Maschine und der einlaufenden Bahnkante über die dargestellte Schnittstelle zu untersuchen. Zusätzlich wird ein modellierter Regelkreis für das System hinzugefügt. Dabei fungiert z_{aus} als Regelgröße, z_{ein} als Störgröße und z_L als Stellgröße. Im nächsten Schritt wird beispielhaft die Funktionsweise dieses Vorgehens illustriert. Zunächst werden Datensätze zu dem auftretenden Bahnzug F_{Bahn} und der Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} mithilfe des Modells des flexiblen Vereinzelungsmoduls erstellt. Die Daten werden dem Materialbahnmodell an der Position des Drehrahmens im System entnommen. Anschließend erfolgt eine exemplarische Messung einer Bahnkante.

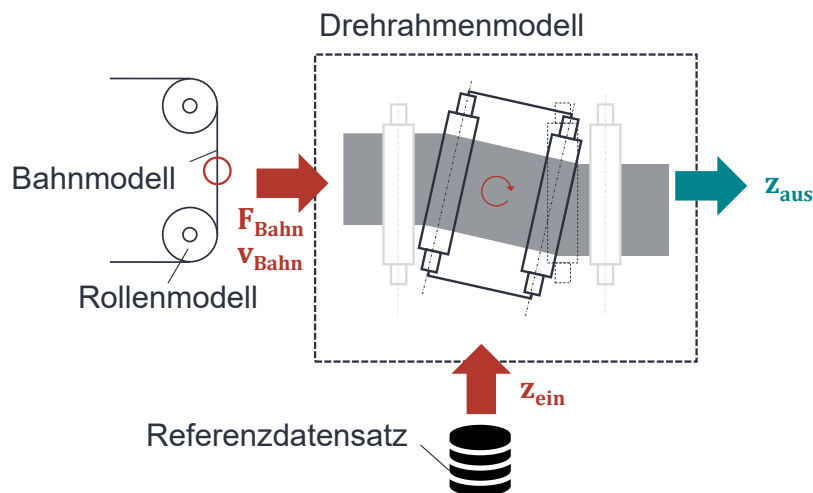


Abbildung 9-11: Schnittstellen und Kopplung des Drehrahmenmodells (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))

Abbildung 9-12 zeigt die verwendeten Eingangswerte für das Modell des Drehrahmens. Auf der linken Seite sind ein beispielhafter modellierter Bahnzug und Bahngeschwindigkeitsverlauf abgebildet. Auf der rechten Seite ist ein Referenzdatensatz einer gemessenen lateralen Verschiebung einer Bahnkante zu sehen, welche als einlaufende Bahnkante z_{ein} fungiert.

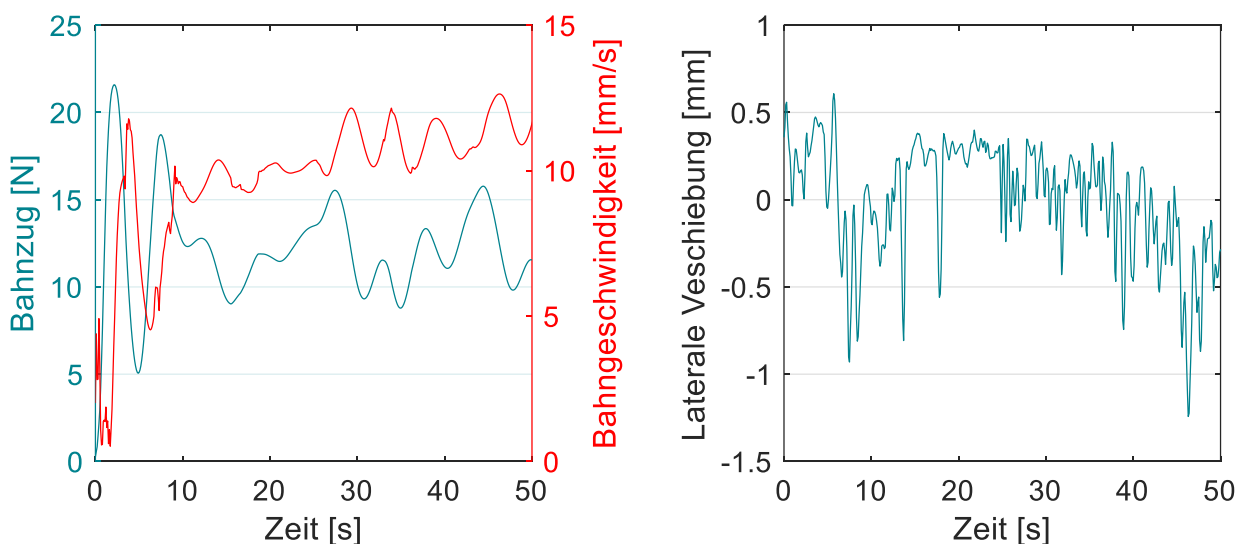


Abbildung 9-12: Eingangswerte für das Modell des Drehrahmens – Bahnzug und Bahngeschwindigkeit (links), laterale Verschiebung (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))

Auf Basis dieser Datensätze werden anschließende Untersuchungen zu dem Verhalten des Drehrahmens und der resultierenden auslaufenden Bahnkante z_{aus} in Abhängigkeit von unterschiedlichen Reglereinstellungen vorgenommen. Für die Simulation wird ein

PID-Regler verwendet, dessen Verstärkungsfaktoren K_P , K_I und K_D variiert werden. K_P und K_I werden von 0 bis 1 in Schritten von 0,1 variiert, während K_D von 0 bis 0,1 in Schritten von 0,01 verändert wird. Diese Variationsstufen dienen als erster Ausgangspunkt und sollen einen Überblick über die Auswirkungen der Kontrollparameter geben. Tabelle 9-1 zeigt einen Auszug aus der iterativen Variation der Regler-Verstärkungsfaktoren.

Tabelle 9-1: Reglerparameter des Drehrahmenmodells

Setup-Nr.	PID-Verstärkungsfaktoren			Quadratsumme
	K_P	K_I	K_D	$\sqrt{K_P^2 + K_I^2 + K_D^2}$
1	0	0	0	0
2	0,1	0	0	0,1
3	0,2	0	0	0,2
...	0,6	0,2	0,05	0,63
1331	1	1	0,1	1,42

Die Quadratsumme der Verstärkungsfaktoren wird für die anschließende Visualisierung der Ergebnisse eingeführt. Die Berechnung ist ebenfalls in der Tabelle 9-1 dargestellt. Die Standardabweichung der modellierten lateralen Verschiebung am Ausgang z_{aus} des Drehrahmens wird als Qualitätskriterium verwendet. Dieser Kennwert gibt einen Hinweis auf den Grad der Bahnkantenschwankungen und auf die Fähigkeit des Systems zur Regelung der Bahnkante. Insgesamt werden 1 331 Simulationenläufe mit diesem iterativen Ansatz durchgeführt. Die Modellierung des Systems und die Simulationenläufe erfolgen mittels *Matlab*. Abbildung 9-13 zeigt die Ergebnisse dieser Simulationsstudie. Dargestellt ist die Standardabweichung in Abhängigkeit von der Quadratsumme der PID-Reglerparameter des Drehrahmens. Auf der linken Seite sind alle Ergebnisse dargestellt. Die rechte Seite beinhaltet die Ergebnisse mit einer simulierten Standardabweichung bis 1 mm. Generell ist erkennbar, dass eine Vielzahl der Punkte über einer Standardabweichung von 10 mm zu verorten ist. Bei diesen Simulationenläufen ist der K_D -Verstärkungsfaktor größer als null. Die Verwendung des differentiellen Anteils ist daher nicht empfehlenswert. Die optimalen ermittelten Verstärkungsfaktoren liegen bei $K_P = 0,9$, $K_I = 1,0$ und $K_D = 0$. Die minimale Standardabweichung beträgt hierbei 0,155 mm. Der entsprechende Datenpunkt ist in der Abbildung rot markiert.

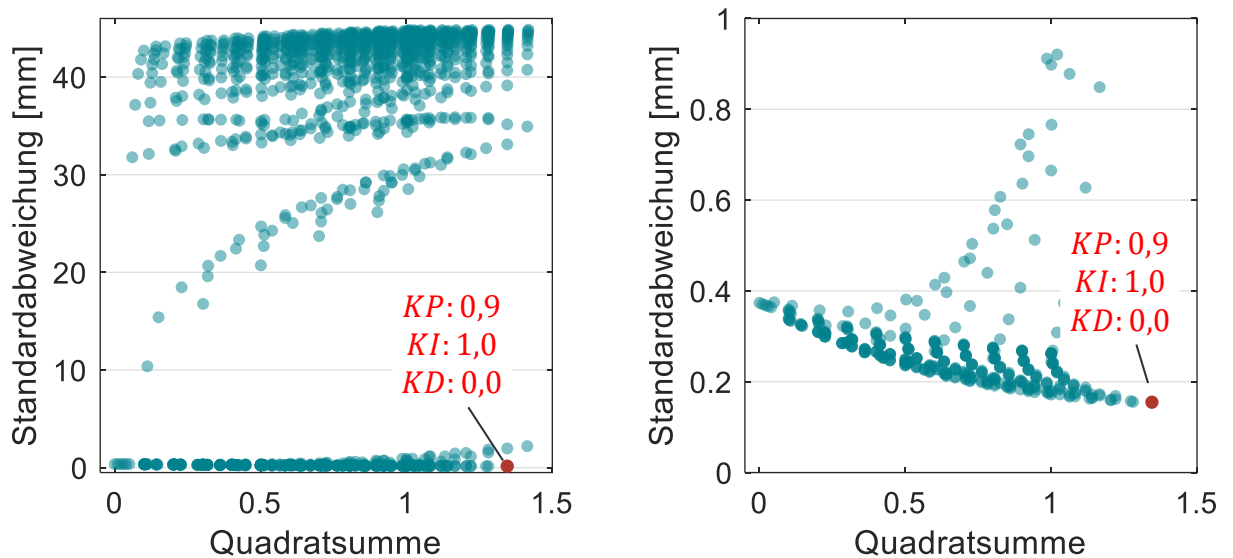


Abbildung 9-13: Standardabweichung der lateralen Verschiebung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Reglerparametern (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))

Da der Reglerparameter KI im Optimum bei 1,0 liegt, was dem maximalen Wert in der durchgeführten Simulationsstudie entspricht, kann davon ausgegangen werden, dass eine weitere Erhöhung dieses Parameters das Regelverhalten weiter optimiert.

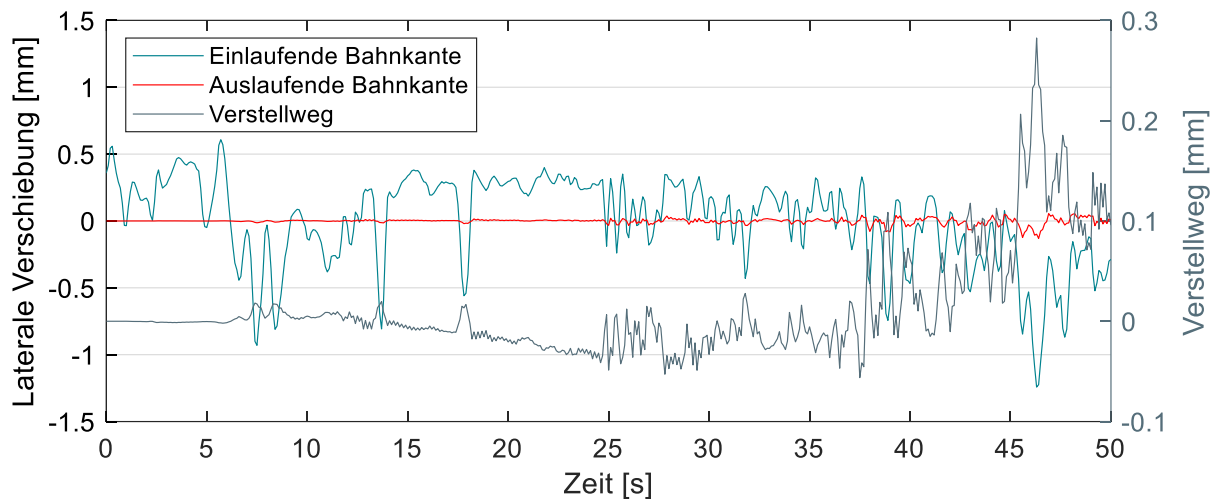


Abbildung 9-14: Laterale Verschiebungen und Verstellweg (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))

Abbildung 9-14 zeigt die laterale Verschiebung der ein- und auslaufenden Bahnkante und den Verstellweg bei der Anwendung der optimalen ermittelten Reglerparameter. Generell ist zu erkennen, dass der Fehler der einlaufenden Bahnkante z_{ein} mit den gewählten Reglerparametern reduziert wird. Allerdings wird die Bahnkante nicht vollständig auf den Sollwert von 0 mm geregelt. Es wäre sinnvoll, an dieser Stelle weitere

Optimierungsschleifen durchzuführen. An dem Verhalten der Stellgröße respektive dem Verstellweg z_L lässt sich das dynamische Verhalten des Drehrahmens charakterisieren. Auf dieser Basis und mittels Kenntnissen der Materialeigenschaften kann anschließend eine Abschätzung erfolgen, ob es zu einer Materialbeschädigung kommt.

9.4 Modellanwendung für den Maschinenbetrieb

Die bisherigen Ausführungen haben die Anwendung der entwickelten Modelle primär im Kontext der Entwicklung, Inbetriebnahme und Konfiguration von Maschinen beleuchtet. Im weiteren Verlauf werden die Einsatzmöglichkeiten dieser Modelle für den Betrieb (AF3) der Maschinen dargestellt. Generell lassen sich mithilfe der dargestellten Modelle diverse Parameter modellbasiert untersuchen. Diese sind nicht auf die bisher dargestellten Zielgrößen beschränkt. So können z. B. ebenfalls sämtliche Positionsänderungen der Komponenten, Materialbahngeschwindigkeiten und Beschleunigungsvorgänge während des Betriebs der Maschine ausgegeben und untersucht werden. Ein essenzieller Bestandteil ist die Kopplung der Modelle mit realen Parametern der Maschinensteuerung. Abbildung 9-15 veranschaulicht vereinfacht eine mögliche Modellintegration und deren Schnittstellen am Beispiel des flexiblen Vereinzelungsmoduls. Generell erfolgt die Anregung des gesamten Systems primär über die elektrischen Antriebe. Demnach bietet es sich an, hier die Schnittstelle zwischen Realsystem und Modell zu definieren. So besteht z. B. die Möglichkeit, entsprechende Kennzahlen der Antriebssysteme, wie etwa die aktuellen Drehzahlen, zu verwenden, um das Modell anzuregen. Generell werden diese Informationen von dem entsprechenden Servomotor über dessen Umrichter an die SPS bzw. die Maschinensteuerung mittels *Profinet-Kommunikationsstandard* übermittelt. Das Modell selbst wird auf einem entsprechenden Industrie-PC bzw. Edge-System ausgeführt, welches ebenfalls über eine adäquate Ethernetschnittstelle mit der SPS verbunden ist. Hierdurch werden Daten der Antriebssysteme dem Modell als Eingangsparameter übermittelt. Eine grundsätzlich relevante Anwendung ist die Simulation des Bahnzugs an jeder Position in der Maschine während des Betriebs. Hierdurch können vollumfängliche Aussagen zu der Materialbelastung getätigt werden. Weiterhin können auf dieser Basis weitere Anwendungen abgeleitet werden. Hierzu zählt z. B. ebenfalls das Regeln entsprechender virtuell ermittelter Größen mittels realer Stellgrößen. Für diese Vorhaben existieren geeignete Applikationen in der Produktpalette der *Siemens AG*. Hierzu zählt z. B. die „*LiveTwin Edge App*“ (*Siemens AG* 2024).

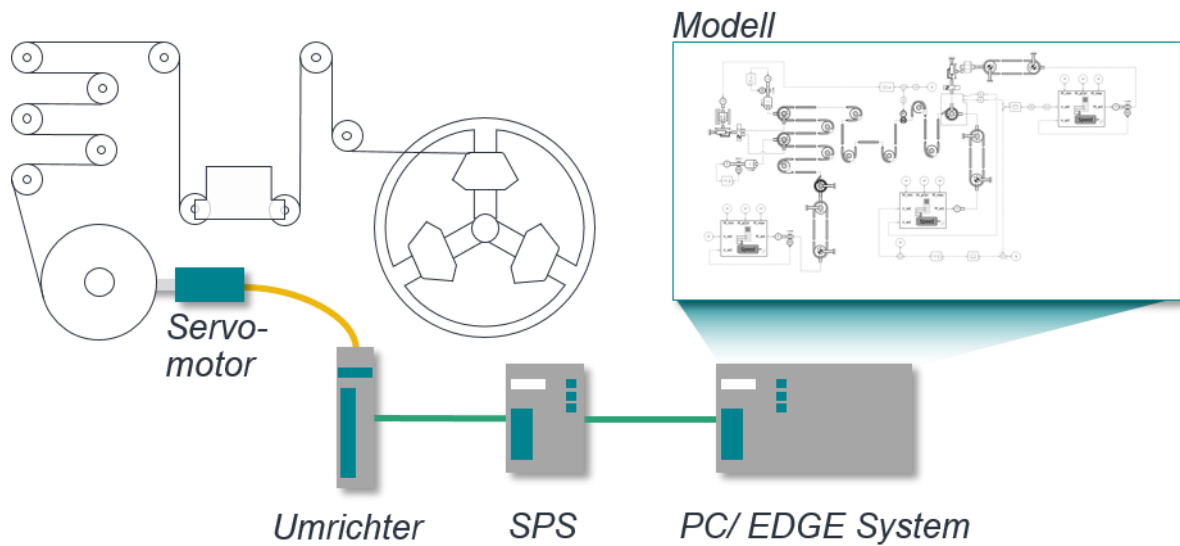


Abbildung 9-15: Vereinfachte Darstellung zur Kopplung des Modells mit der Maschinensteuerung

Unabhängig von den Schnittstellen und der konkreten Architektur besteht die Notwendigkeit, die entwickelten Modelle für diese Anwendungen in der Laufzeit zu optimieren. In (Husseini et al. 2022b) wird ein Ansatz zur Laufzeitoptimierung mittels *Reduced Order Model* (ROM) vorgestellt. Bei dem ROM handelt es sich um ein KI-Modell, welches mittels Daten des Simulationsmodells trainiert wird. Für das konkrete Training wird die in dem Simulationstool *Simcenter Amesim* integrierte Applikation *Neural-Network-Builder* verwendet. Das Training erfolgt hier beispielhaft für ein Materialsystem. Die Eingangsparameter beziehen sich auf die Einstellparameter der Maschine. Diese sind die zu vereinzelnde Elektrodenblattlänge L_{Sheet} , die Bahngeschwindigkeit v_{Bahn} und der zu regelnde Bahnzug $F_{Bahn,soll}$. Hierbei handelt es sich um konstante Werte. Da die konkreten Bahnzugverläufe mithilfe des ROM dargestellt werden, wird als Eingangsparameter ebenfalls die nicht konstante Drehzahl des Handhabungssystems für das Training verwendet. Weiterhin besteht hier die Möglichkeit, sämtliche Ausgangsparameter festzulegen. Für das folgende Beispiel wurde der Bahnzug an der Position A im Modell des flexiblen Vereinzelungsmoduls verwendet. Das ROM wird aus 26 Datensätzen mit jeweils 1 800 Datenpunkten generiert. Es werden zufällig 13 Trainingsdatensätze und 13 Validierungsdatensätze ausgewählt. Die Anzahl der versteckten Schichten beträgt drei. Die Schichten haben jeweils zehn Neuronen und werden mit einer *Tangens-Hyperbolicus-Funktion* aktiviert. Die erste und dritte Schicht sind vom Typ *Dense*. Hierbei sind alle Neuronen der zweiten Schicht mit allen Neuronen der ersten und dritten

Schicht verknüpft. Abbildung 9-16 veranschaulicht beispielhaft den Vergleich zwischen Daten der Simulation und dem ROM.

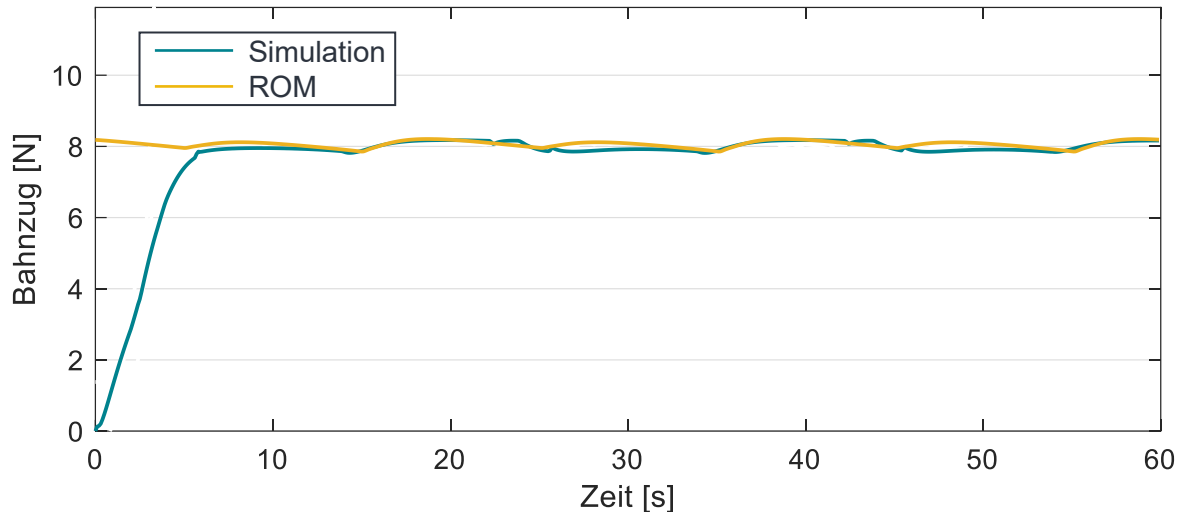


Abbildung 9-16: Beispielhafter Vergleich der Werte des Simulationsmodells und des ROM (in Anlehnung an (Husseini et al. 2022b; A_Maibaum 2022))

Es ist erkennbar, dass das ROM die periodischen Schwankungen des Bahnzugs ebenfalls abbildet. Allerdings wird das Verhalten des Bahnzugs beim Anfahren der Maschine (0 s bis ca. 7 s) nicht dargestellt. Generell kommt es bei diesem Ansatz zu einer Abweichung zwischen den Daten, welche mittels Simulationsmodell und des ROM generiert werden. Die Genauigkeit hängt hierbei von dem Training des neuronalen Netzes ab. Somit weisen die Daten des ROM im Vergleich zum Simulationsmodell eine höhere Abweichung zu der Realität auf. Die Simulation wurde für einen Maschinenbetrieb von 60 s mit einem diskreten Zeitschritt von 0,05 s durchgeführt. Demnach werden 1 200 Datenpunkte simuliert. Das Simulationsmodell benötigt hierfür eine Rechenzeit von 33,69 s. Das bedeutet, dass pro Sekunde 35,6 Datenpunkte simuliert werden. Mittels ROM wird die gleiche Datenmenge innerhalb von 0,0067 s generiert. Dies führt zu einer Geschwindigkeit von 180 000 Datenpunkten pro Sekunde. In Bezug auf die Anforderungen ergibt sich, dass innerhalb eines Zyklus der SPS mindestens ein Datenpunkt durch das ROM generiert werden sollte. Die Zykluszeit beträgt hierbei 2 ms. Innerhalb dieser Zeit werden 360 Datenpunkte mittels ROM generiert. Die Anforderungen werden somit erfüllt.

9.5 Zusammenfassung: Anwendungsszenarien

Im Rahmen dieses Kapitels wurden verschiedene Anwendungen und Szenarien für die Nutzung und Erweiterung des Modells des flexiblen Vereinzelungsmoduls und der Z-Falt-Stapelmaschine vorgestellt. Hierbei wurden die in Kapitel 4.1 definierten Anwendungsfälle aufgegriffen und die validierten Modelle zur Generierung der Simulationsdaten verwendet. Den Anwendern dieser Modelle stehen spezifische Möglichkeiten zur Verfügung, die das Potenzial bieten, Optimierungsansätze in verschiedenen Phasen des Maschinenlebenszyklus zu erschließen: nämlich bei der Entwicklung neuer Maschinen (AF1), deren Inbetriebnahme und Einrichtung (AF2) sowie bei deren Betrieb (AF3). So können generell die für den Entwicklungsprozess entsprechenden Auswirkungen von Komponenten und deren Parametern und Ansteuerung auf qualitätsspezifische Aspekte modellbasiert untersucht werden. Weiterhin lassen sich Regelungsstrategien für den Bahnzug untersuchen und bewerten. Für die Inbetriebnahme bzw. das Einrichten können dem Bediener entsprechende Auswirkungen der Einstellparameter der Maschine auf ein zu verarbeitendes Material weitergegeben werden. Hierdurch lassen sich wiederum Prozessgrenzen ableiten. Die Rechenzeit der Simulationsstudien lag zwischen ca. 18 und 24 Stunden. Die Aussage soll verdeutlichen, dass das Durchführen solcher Studien grundsätzlich zeitaufwendig ist, jedoch potenziell problematische Wechselwirkungen aufdecken kann, die in der praktischen Umsetzung zu einem erheblich höheren Aufwand und Kosten führen. Für den Betrieb der Maschine besteht die Möglichkeit, die Modelle über die Antriebsparameter mit Daten der realen Steuerung zu verknüpfen. Notwendigerweise sollte eine Laufzeitoptimierung durchgeführt werden, welche über sog. *Reduced-Order-Modelle* erreicht werden kann. Zusätzlich wurde eine Modellerweiterung um Teilmodelle für ein Bahnführungssystem vorgestellt. Hierdurch wird verdeutlicht, dass die Modelle mit einer Vielzahl anderer Modelle gekoppelt werden können und, je nach Fokus, sich kontinuierlich erweitern lassen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Die beobachtbare globale Transformation des Mobilitätssektors hin zur Elektromobilität bedingt einen signifikant ansteigenden Bedarf an Batteriezellkapazität. In diesem Zusammenhang lassen sich diverse weitere, oftmals unvorhersehbare Trends in Bezug auf Materialneuentwicklungen und Zelldesigns erkennen. Diese Tatsache stellt sowohl Zellhersteller als auch Maschinenbauunternehmen, welche das Produktionsequipment bereitstellen, vor große Herausforderungen. Die Produktionsmaschinen werden in der Entwicklung falsch dimensioniert und ausgelegt. Bei deren Inbetriebnahme und Betrieb kommt es nach wie vor zu hohen Materialausschussraten. Insbesondere bietet der Prozessschritt der Zellstapelbildung aufgrund einer diskreten Prozessführung und generellen Fehleranfälligkeit ein hohes Optimierungspotenzial. Eine grundsätzliche Ursache für hohe Materialausschussraten und für falsche Dimensionierung und Auslegung von Produktionsmaschinen liegt in dem unzureichenden respektive fehlenden Verständnis von Wirkzusammenhängen zwischen Material, Prozess und Maschine. Zur Quantifizierung dieser Wirkzusammenhänge gibt es diverse Bestrebungen in der Modellentwicklung. Ein Großteil dieser Aktivitäten liegt in der Modellierung materialseitiger Einflüsse auf die Produktionsprozesse.

Diese Arbeit stellt eine Ergänzung hinsichtlich der Modellierung maschinenseitiger Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess dar. Das Ziel der Arbeit ist demnach die Entwicklung geeigneter Modelle zur Beschreibung dieser Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess von Batteriezellen. Der Anspruch der Arbeit liegt in der Generalisierbarkeit der angewendeten Methodik sowie in der Anwendbarkeit der entwickelten Modelle für die Entwicklung, Inbetriebnahme und den Betrieb verschiedener Maschinen. Zu diesem Zweck wurden zwei unterschiedliche Maschinen untersucht, und die Modelle wurden anhand ausgewählter Anwendungsfälle exemplarisch evaluiert. Im Fokus dieser Arbeit stehen spezifische Maschinen des *wbk Institut für Produktionstechnik* des *KIT*. Hierbei handelt es sich um das flexible Vereinzelungsmodul und um eine Z-Falt-Stapelmaschine.

Grundsätzlich bestehen die ersten Schritte aus einer umfassenden Systemanalyse und der Definition der zu modellierenden Zielgröße. Die hier identifizierte Zielgröße beläuft sich in erster Linie auf die Materialbelastung der Elektroden- und Separatorbahnen in

Form des auftretenden Bahnzugs. Dieser schlägt sich insbesondere bei dem Vereinzelungsprozess von Elektrodenblättern in Abweichungen in der geometrischen Maßhaltigkeit und bei der Stapelbildung in einer Materialbeschädigung der Separatorbahnen nieder.

Auf Basis der Systemanalyse, bei welcher sämtliche Komponenten und Funktionen der Maschinen analysiert wurden, konnte in einem nächsten Schritt eine systematische Bewertung der Komponenten vorgenommen werden. Diese Bewertung dient dazu, jene Komponenten zu identifizieren, welche einen hohen Einfluss auf die Zielgröße haben. Diese Komponenten erfordern schließlich einen hohen Detaillierungsgrad in der Modellierung. Die restlichen Komponenten werden mit einem niedrigeren Detaillierungsgrad dargestellt bzw. vernachlässigt.

Anschließend erfolgte die Modellformalisierung unter primärer Verwendung des Softwaretools *Simcenter Amesim*. Hierbei wurden die einzelnen Komponenten über entsprechende physikalische Zusammenhänge beschrieben und miteinander verknüpft.

Nachdem die Modelle formalisiert worden waren, erfolgte die Parametrierung einzelner Teilmodelle. Die Ermittlung entsprechender Kennwerte stand hierbei im Fokus. Eine Vielzahl der Parameterkennwerte lässt sich über Recherche, Berechnung oder die Ableitung von Kennwerten aus dem CAD ermitteln. Die Materialeigenschaften der Elektroden- und Separatorbahnen, Reibwerte zwischen Material- und Rollenoberfläche und Rundlaufgenauigkeiten wurden über eine experimentelle Vorgehensweise ermittelt.

Nach der Formalisierung und Parametrierung der Modelle erfolgte die Validierung ihrer Güte. Dieser Schritt dient dazu, dem Anwender eine Einschätzung zu der Fähigkeit der Modelle zu geben, die entsprechenden Zielgrößen präzise vorherzusagen. Mittels einer statistischen Versuchsplanung wurden Studien mit dem flexiblen Vereinzelungsmodul und der Z-Falt-Stapelmaschine durchgeführt. Ein grafischer und ein objektiver Vergleich zwischen Mess- und Simulationsdaten schlossen sich daran an. Insgesamt sind die Modelle in der Lage, relevante Charakteristiken in den Bahnzugverläufen abzubilden.

Anschließend erfolgte mithilfe der validierten Modelle eine Erläuterung der unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten. Primär sollen dem Anwender die Potenziale und Einsatzmöglichkeiten der Modelle dargestellt werden. Diesbezüglich handelt es sich um die Ermittlung geeigneter Regelungsmethoden, um die Analyse der Auswirkungen von

Einstell- und Materialparametern und um die Nutzung der Modelle während des Betriebs der Maschinen. Die Erweiterung durch Modelle von Bahnführungssystemen konnte als Bestandteil der Anwendungen dargestellt werden.

Die hier beschriebenen Vorgehensweisen, Methoden und Ergebnisse sollen den Herstellern von Produktionsequipment und den Zellherstellern als Leitfaden und Inspirationsquelle dienen, um entsprechende Modelle zur Quantifizierung der maschinenseitigen Einflüsse auf die Produktionsprozesse zu entwickeln und diese für verschiedene Phasen im Lebenszyklus der Maschine einzusetzen.

10.2 Ausblick

Im Ausblick und in der Weiterführung der vorgestellten Aktivitäten stehen verschiedene Aspekte. Für eine ganzheitliche Modellierung der Vereinzelung und Stapelbildung steht die Verknüpfung der Modelle, welche die maschinenseitigen Einflüsse auf den Prozess fokussieren, mit Modellen, welche im Schwerpunkt vielmehr die materialeseitigen Einflüsse auf den Prozess betrachten. So können z. B. die modellierten Bahnzugschwankungen dazu genutzt werden, in Kombination mit Modellen zur Simulation der materialeseitigen Einflüsse die konkreten resultierenden und absoluten geometrischen Abmessungen der einzelnen Elektrodenblätter vorherzusagen. Für die Stapelbildung bietet es sich an, mithilfe der simulierten Bahnzüge entsprechende Ausprägungen von Falten oder lokalen Spannungsspitzen, welche zu Rissen und einer Querkontraktion führen können, vorherzusagen. Hierfür kann beispielsweise auf bereits existente FE-Modelle anderer Arbeiten zurückgegriffen werden.

Ein weiterer Schritt besteht darin, die Modelle während des Betriebs der Produktionsmaschinen konkret zu implementieren und zu nutzen. Dadurch eröffnen sich zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten in Bereichen wie *virtual sensing*, *condition monitoring* und modellbasierter Regelung. Beispielsweise ermöglicht ein umfassendes Modell, das präzise die resultierenden Maßabweichungen der einzelnen Elektrodenblätter vorhersagen kann, eine Regelung auf Basis dieser modellierten Daten.

Ein wichtiger nächster Schritt besteht in der Kopplung der entwickelten Modelle mit entsprechenden Modellen anderer Prozessschritte. Da die Prozesse der Batterieproduktion von einer hohen Abhängigkeit voneinander gekennzeichnet sind, ist es zwingend notwendig, im Kontext einer gesamtheitlichen Optimierung die prozessübergreifenden Zusammenhänge zu quantifizieren. Hierbei steht die Identifikation geeigneter Schnittstellen im Fokus. Bezogen auf die vorgestellten Modelle besteht z. B. die Möglichkeit,

ein Modell des Kalandrierens hinzuzuziehen, bei welchem ebenfalls die Oberflächenrauheit der Elektroden simuliert wird. Diese Kenngröße kann anschließend genutzt werden, um die Teilmodelle der Umlenkrollen beim Vereinzelungsprozess hinsichtlich der Reibungswerte zu parametrieren.

11 Literaturverzeichnis

11.1 Liste eigener Veröffentlichungen

Husseini et al. 2024a

Husseini, K.; Gupta, V.; Schabel, S. & Fleischer, J. (2024), „Model-Based Exploration of Web Guiding Behavior for a Novel Battery Cell Stacking Process“, *Energy Technology*. <https://doi.org/10.1002/ente.202401046>.

Husseini et al. 2024b

Husseini, K.; Boschert, L.; Schabel, S. & Fleischer, J. (2024), „Modeling machine-side influences on the Z-Folding process of battery cells“, *Production Engineering*, 18(3-4), S. 615–623. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01248-w>.

Husseini et al. 2022a

Husseini, K.; Schmidgruber, N.; Henschel, S.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2022), „Model-Based Optimization of Web Tension Control for the Flexible Cell Stack Assembly of Lithium-Ion Battery Cells“, *Energy Technology*, 11(5), S. 1–8. <https://doi.org/10.1002/ente.202200679>.

Husseini et al. 2022b

Husseini, K.; Schmidgruber, N.; Weinmann, H.; 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“, *Procedia CIRP*, 106(35), S. 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.150>.

Husseini et al. 2023

Husseini, K.; Hernández, H. T. A.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2023), „Potentials and Design of a Virtual Production System for Intelligent Battery Cell Manufacturing“ in *Future Automotive Production Conference 2022*, Hrsg. K. Dröder & T. Vietor, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 253–264.

Kollenda et al. 2023

Kollenda, A.; Husseini, 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), S. 1–17. <https://doi.org/10.1002/ente.202201059>.

Yesilyurt et al. 2022

Yesilyurt, O.; Brandt, D.; Grimm, J.; Hussein, K.; Naumann, A.; Meiners, J. & Becker-Koch, D. (2022), „Development of a Semantic Database Model to Facilitate Data Analytics in Battery Cell Manufacturing“. *Proceedings of the 11th International Conference on Data Science, Technology and Applications*, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, S. 13–20. ISBN: 978-989-758-583-8. <https://doi.org/10.5220/0011139500003269>.

11.2 Liste verwendeter Literatur

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

A_Boschert, L. 2023

A_Boschert, L. (2023), *Entwicklung digitaler Maschinenzwillinge für Stapelbildungsprozesse von Batteriezellen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Gupta, V. 2024

A_Gupta, V. (2024), *Integrated Modelling and Simulation of Web Guiding Systems in Battery Cell Stacking: Enabling Digital Twin Integration*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Maibaum, K. 2022

A_Maibaum, K. (2022), *Die Entwicklung eines digitalen Zwillings für die Stapelbildung in der Lithium-Ionen-Batteriezellfertigung*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Andre et al. 2015

Andre, D.; Kim, S.-J.; Lamp, P.; Lux, S. F.; Maglia, F.; Paschos, O. & Stiaszny, B. (2015), „Future generations of cathode materials: an automotive industry perspective“, *Journal of Materials Chemistry A*, 3(13), S. 6709–6732. <https://doi.org/10.1039/C5TA00361J>.

Asylbekov et al. 2021

Asylbekov, E.; Trunk, R.; Krause, M. J. & Nirschl, H. (2021), „Microscale Discrete Element Method Simulation of the Carbon Black Aggregate Fracture Behavior in a Simple Shear Flow“, *Energy Technology*, 9(6), S. 1–9. <https://doi.org/10.1002/ente.202000850>.

Aydemir et al. 2021

Aydemir, M.; Mooy, R.; Müller, A.; Glodde, A. & Dietrich, F. (2021), *High throughput feeding of battery electrode sheets: accuracy vs. throughput vs. electrode-damage*.

Aydemir, M. 2021

Aydemir, M. (2021), *Modellbasierte Prozessgrenzenermittlung in der Entwicklung und Inbetriebnahme von Hochdurchsatz-Batteriestapelverfahren*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin.

Bach, G. 2017

Bach, G. (2017), *Beitrag zur Produktivitätssteigerung in der Massenherstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin.

Bargel 2022

Bargel, H.-J. (2022), *Werkstoffkunde*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-63960-3.

Baumeister et al. 2015

Baumeister, M.; Haag, S. & Fleicher, J., *Electrode Assembly, Method for the Production Thereof, and Electrochemical Cell*(2015), WO 2015/071284 A1.

Baumeister, M. 2017

Baumeister, M. (2017), *Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Bender et al. 2018

Bender, B.; Feldhusen, J.; Krause, D.; Beckmann, G.; Paetzold, K. & Hövel, A. (2018), „Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens“ in *Dubbel*, Hrsg. K.-H. Grote, B. Bender & D. Göhlich, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 372–411.

Boeselager et al. 2022

Boeselager, C. von; Kapelar, M. O. & Dröder, K. (2022), „Multi-Body Simulation of a Novel Electrode Stacking Process for Lithium-Ion Battery Production“, *Procedia CIRP*, 112, S. 519–524. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.092>.

Boeselager 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), S. 1–12. <https://doi.org/10.1002/ente.202200687>.

Bold & Fleischer 2018

Bold, B. & Fleischer, J. (2018), „Kalandrieren von Elektroden für Li-Ionen-Batterien. Wechselwirkungen zwischen Anlagen- und Materialparametern“, 113(9), S. 571–575. <https://doi.org/10.3139/104.111968>.

Bold, B. 2023

Bold, B. (2023), *Kompensation der wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathode. Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Boyce et al. 2021

Boyce, A. M.; Cumming, D. J.; Huang, C.; Zankowski, S. P.; Grant, P. S.; Brett, D. J. L. & Shearing, P. R. (2021), „Design of Scalable, Next-Generation Thick Electrodes: Opportunities and Challenges“, *ACS nano*, 15(12), S. 18624–18632. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c09687>.

Branca et al. 2013

Branca, C.; Pagilla, P. R. & Reid, K. N. (2013), „Governing Equations for Web Tension and Web Velocity in the Presence of Nonideal Rollers“, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 135(1), S. 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4007974>.

Brüggemann & Bremer 2015

Brüggemann, H. & Bremer, P. (2015), *Grundlagen Qualitätsmanagement*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-09220-7.

Chang et al. 2018

Chang, C.-W.; Lee, H.-W. & Liu, C.-H. (2018), „A Review of Artificial Intelligence Algorithms Used for Smart Machine Tools“, *Inventions*, 3(3), S. 1–28. <https://doi.org/10.3390/inventions3030041>.

Chen et al. 2015

Chen, G.; Zhu, S. & Zheng, Q. (2015), „Dynamic parameters' identification for the feeding system of computer numerical control machine tools stimulated by G-code“, *Advances in Mechanical Engineering*, 7(8), S. 1–9.
<https://doi.org/10.1177/1687814015597830>.

Danilovic & Browning 2007

Danilovic, M. & Browning, T. R. (2007), „Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices“, *International Journal of Project Management*, 25(3), S. 300–314.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.003>.

Deimede & Elmasides 2015

Deimede, V. & Elmasides, C. (2015), „Separators for Lithium-Ion Batteries: A Review on the Production Processes and Recent Developments“, *Energy Technology*, 3(5), S. 453–468. <https://doi.org/10.1002/ente.201402215>.

Diehm et al. 2020

Diehm, R.; Weinmann, H.; Kumberg, J.; Schmitt, M.; Fleischer, J.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2020), „Edge Formation in High-Speed Intermittent Slot-Die Coating of Disruptively Stacked Thick Battery Electrodes“, *Energy Technology*, 8(2), S. 1–8. <https://doi.org/10.1002/ente.201900137>.

DIN EN ISO 527 2019

DIN EN ISO 527 2019 , *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN ISO 8295 2004

DIN EN ISO 8295 2004 , *Kunststoffe - Folien und Bahnen - Bestimmung der Reibungskoeffizienten*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN 60812 2006

DIN EN 60812 2006 , *Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN EN IEC 81346-2 2019

DIN EN IEC 81346-2 2019 , *Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und*

Industrieprodukte – Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung – Teil 2: Klassifizierung von Objekten und Kennbuchstaben für Klassen.

Dittmann et al. 2022

Dittmann, S.; Glodde, A. & Dietrich, F. (2022), „Manufacturing improvement capabilities of machine learning algorithms: Evaluation using an electrode-separator compound handling demonstrator“, *Procedia CIRP*, 106, S. 150–155. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.170>.

Doppelbauer 2020

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

Du et al. 2023

Du, C.; Zhao, Z.; Liu, H.; Song, F.; Chen, L.; Cheng, Y. & Guo, Z. (2023), „The Status of Representative Anode Materials for Lithium-Ion Batteries“, *Chemical record (New York, N.Y.)*, 23(5), e202300004. <https://doi.org/10.1002/tcr.202300004>.

Fröhlich 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“, *Procedia CIRP*, 78, S. 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.322>.

Galant et al. 2016

Galant, A.; Beitelschmidt, M. & Großmann, K. (2016), „Fast High-Resolution FE-based Simulation of Thermo-Elastic Behaviour of Machine Tool Structures“, *Procedia CIRP*, 46, S. 627–630. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.020>.

Gassmann et al. 2009

Gassmann, V.; Knittel, D.; Pagilla, P. R. & Bueno, M.-A. (2009), „H[∞] unwinding web tension control of a strip processing plant using a pendulum dancer“. *2009 American Control Conference*, IEEE, S. 901–906. ISBN: 978-1-4244-4523-3. <https://doi.org/10.1109/ACC.2009.5160554>.

Günther et al. 2020

Günther, T.; Schreiner, D.; Metkar, A.; Meyer, C.; Kwade, A. & Reinhart, G. (2020), „Classification of Calendering-Induced Electrode Defects and Their Influence on

Subsequent Processes of Lithium-Ion Battery Production“, *Energy Technology*, 8(2), S. 1–9. <https://doi.org/10.1002/ente.201900026>.

Haag, S. 2020

Haag, S. (2020), *Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk - Institut Für Produktionstechnik. <https://doi.org/10.5445/IR/1000124957>.

Haberhauer 2018

Haberhauer, H. (2018), *Maschinenelemente*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-53047-4.

Haessig & Friedland B. 1991

Haessig, D. & Friedland B. (1991), „On the Modeling and Simulation of Friction“, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 113(3), S. 354–362. <https://doi.org/10.1115/1.2896418>.

Hagemeister et al. 2022

Hagemeister, J.; Günter, F. J.; Rinner, T.; Zhu, F.; Papst, A. & Daub, R. (2022), „Numerical Models of the Electrolyte Filling Process of Lithium-Ion Batteries to Accelerate and Improve the Process and Cell Design“, *Batteries*, 8(10), S. 1–15. <https://doi.org/10.3390/batteries8100159>.

Henschel et al. 2023

Henschel, S.; Otte, S.; Mayer, D. & Fleischer, J. (2023), „Use Cases for Digital Twins in Battery Cell Manufacturing“ in *Production at the Leading Edge of Technology*, Hrsg. M. Liewald, A. Verl, T. Bauernhansl & H.-C. Möhring, Springer International Publishing, Cham, S. 833–842.

Hoffmann et al. 2023

Hoffmann, A.; Spiegel, S.; Heckmann, T.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2023), „CFD model of slot die coating for lithium-ion battery electrodes in 2D and 3D with load balanced dynamic mesh refinement enabled with a local-slip boundary condition in OpenFOAM“, *Journal of Coatings Technology and Research*, 20(1), S. 3–14. <https://doi.org/10.1007/s11998-022-00660-8>.

Ilchmann et al. 2006

Ilchmann, A.; Sawodny, O. & Trenn, S. (2006), „Pneumatic cylinders: modelling

and feedback force-control“, *International Journal of Control*, 79(6), S. 650–661.
<https://doi.org/10.1080/00207170600645875>.

Jacobs, G. 2014

Jacobs, G. (2014), *Maschinengestaltung*. Vorlesungsumdruck, RWTH-Aachen, Aachen, Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung.

Jansen et al. 2020

Jansen, T.; Kandula, M. W.; Blass, D.; Hartwig, S.; Haselrieder, W. & Dilger, K. (2020), „Evaluation of the Separation Process for the Production of Electrode Sheets“, *Energy Technology*, 8(2), S. 1–11.
<https://doi.org/10.1002/ente.201900519>.

Jansen et al. 2019

Jansen, T.; Kandula, M.; Hartwig, S.; Hoffmann, L.; Haselrieder, W. & Dilger, K. (2019), „Influence of Laser-Generated Cutting Edges on the Electrical Performance of Large Lithium-Ion Pouch Cells“, *Batteries*, 5(4), S. 1–20.
<https://doi.org/10.3390/batteries5040073>.

Jayant et al. 2014

Jayant, A.; Gupta, P. & Garg, S. K. (2014), „Simulation Modelling and Analysis of Network Design for Closed-Loop Supply Chain: A Case Study of Battery Industry“, *Procedia Engineering*, 97, S. 2213–2221. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2014.12.465>.

Kampker et al. 2015

Kampker, A.; Heimes, H. H.; Deutskens, C.; Ordnung, M.; Maiser, E. & Michaelis, S. (2015), *Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezeile*, Aachen, Frankfurt am Main.

Kampker 2014

Kampker, A. (2014), *Elektromobilproduktion*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-42021-4.

Keferstein et al. 2018

Keferstein, C. P.; Marxer, M. & Bach, C. (2018), *Fertigungsmesstechnik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-17755-3.

Kies et al. 2021

Kies, D. A.; Krauß, J.; Schmetz, A.; Baum, C.; Schmitt, H. R. & Brecher, C. (2021),

„Der digitale Zwilling in der Batteriezellfertigung/Digital Twin in Battery Cell Production – From Data Management and Traceability System to Target-Oriented Application“, *wt Werkstattstechnik online*, 111(05), S. 286–290.

<https://doi.org/10.37544/1436-4980-2021-05-20>.

Kühnapfel 2019

Kühnapfel, J. B. (2019), *Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-25163-5.

Kurzweil & Dietlmeier 2018

Kurzweil, P. & Dietlmeier, O. K. (2018), *Elektrochemische Speicher*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-21828-7.

Lechler et al. 2019

Lechler, T.; Fischer, E.; Metzner, M.; Mayr, A. & Franke, J. (2019), „Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems“, *Procedia CIRP*, 81, S. 1125–1130. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.278>.

Lee et al. 2022

Lee, M.; Jung, H.; Lee, M.; Kwak, H. & Nam, J. (2022), „Model fluid for coating flows of Li-ion battery anode slurry“, *Journal of Materials Science*, 57(38), S. 17935–17945. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07615-9>.

Leithoff 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), S. 1–8.
<https://doi.org/10.1002/ente.201900129>.

Leithoff 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), S. 1–17.
<https://doi.org/10.3390/en15072670>.

Leuthner 2013

Leuthner, S. (2013), „Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien“ in *Handbuch Lithium-*

Ionen-Batterien, Hrsg. R. Korthauer, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 13–19.

Link 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), S. 1–23.
<https://doi.org/10.3390/batteries9050261>.

Lippke et al. 2023

Lippke, M.; Ohnimus, T.; Heckmann, T.; Ivanov, D.; Scharfer, P.; Schabel, W.; Schilde, C. & Kwade, A. (2023), „Simulation of Structure Formation during Drying of Lithium-Ion Battery Electrodes using Discrete Element Method“, *Energy Technology*, 11(5), S. 1–11. <https://doi.org/10.1002/ente.202200724>.

Martin et al. 2021

Martin, D.; Kühl, N. & Satzger, G. (2021), „Virtual Sensors“, *Business & Information Systems Engineering*, 63(3), S. 315–323. <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00689-w>.

Marton & Lantos 2007

Marton, L. & Lantos, B. (2007), „Modeling, Identification, and Compensation of Stick-Slip Friction“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(1), S. 511–521.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2006.888804>.

Mayer et al. 2023a

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*, S. 1–10. <https://doi.org/10.1002/ente.202200870>.

Mayer et al. 2023b

Mayer, D.; Maier, T. & Fleischer, J. (2023), „Simulation of the stacking process in battery cell manufacturing“, *Procedia CIRP*, 120, S. 1393–1397.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.182>.

Mayer et al. 2021

Mayer, D.; Wurba, A.-K.; Bold, B.; Bernecker, J.; Smith, A. & Fleischer, J. (2021), „Investigation of the Mechanical Behavior of Electrodes after Calendering and Its Influence on Singulation and Cell Performance“, *Processes*, 9(11), S. 1–16.
<https://doi.org/10.3390/pr9112009>.

Mayer & Fleischer 2021

Mayer, D. & Fleischer, J. (2021), „Concept for modelling the influence of electrode corrugation after calendering on stacking accuracy in battery cell production“, *Procedia CIRP*, 104, S. 744–749. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.125>.

Meyer et al. 2017

Meyer, C.; Bockholt, H.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2017), „Characterization of the calendering process for compaction of electrodes for lithium-ion batteries“, *Journal of Materials Processing Technology*, 249, S. 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.031>.

Michaelis 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.; von Horstig, M.-W.; Husmann, J.; Kouli, M.; Mund, M.; Ventura Silva, G.; Weber, M.; Schmetz, A. & Podbreznik, M. (2023), „Roadmap Battery Production Equipment 2030. Update 2023“.

Min Lee et al. 2023

Min Lee, B.; Gao, X.; Sung Kim, H. & Ryol Hwang, W. (2023), „Flow modeling for conveying sections in a co-rotating twin-screw extruder based on energy dissipation rate for continuous mixing of lithium-ion battery slurries“, *Chemical Engineering Science*, 281, S. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119113>.

Mooy, R. 2019

Mooy, R. (2019), *Beitrag zur Produktivitätssteigerung in der Vereinzelung, Positionierung und Orientierung von Elektrodenfolien durch eine kontinuierliche Materialbewegung*. Dissertation, TU Berlin, Berlin.

Moucka 2012

Moucka, M. (2012), „Identification of friction in pneumatic linear drive“. *Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, IEEE, S. 495–500. ISBN: 978-1-4577-1868-7. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2012.6228694>.

Müller 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), S. 1–29.
<https://doi.org/10.3390/pr9111993>.

Neska & Majcher 2014

Neska, M. & Majcher, A. (2014), „System for Automatic Web Guiding for Roll-to-Roll Machine Working in a Start-Stop Mode“, *Solid State Phenomena*, 223, S. 374–382. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.223.374>.

Neuhausen et al. 2022

Neuhausen, J.; Rose, P.; Schnell, C. & Kehrbein, L. (2022), *Gigafactories & Raw Materials. The key to successful battery EV adoption*.

Ngandjong et al. 2021

Ngandjong, A. C.; Lombardo, T.; Primo, E. N.; Chouchane, M.; Shodiev, A.; Arce-lus, O. & Franco, A. A. (2021), „Investigating electrode calendering and its impact on electrochemical performance by means of a new discrete element method model: Towards a digital twin of Li-Ion battery manufacturing“, *Journal of Power Sources*, 485, S. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229320>.

Overbeck, L. V. 2023

Overbeck, L. V. (2023), *Digital Twins of production systems*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Özdemir & Brecher 2013

Özdemir, D. & Brecher, C. (2013), „Disziplinübergreifende Maschinenentwicklung mit dem Mechatronics Concept Designer – erprobt im Anwendungsszenario“, *Tools*, 19, S. 2–4.

Patel 2020

Patel, V. V. (2020), „Ziegler-Nichols Tuning Method“, *Resonance*, 25(10), S. 1385–1397. <https://doi.org/10.1007/s12045-020-1058-z>.

Rückert et al. 2023

Rückert, F. U.; Sauer, M.; Liimatainen, T. & Hübner, D. (2023), *Digital Twin Development*, Springer Nature Switzerland, Cham. ISBN: 978-3-031-25691-2.

Schäfer 2012

Schäfer, T., *Graphen-haltiger Separator für Lithiumionen- Batterien*(2012), Deutschland.

Schmalzhaf et al. 2013

Schmalzhaf, P.; Disterheft, R. & Pfeil, G. (2013), *Grundlagen linearer Antriebstechnik. Hubgetriebe, Stellantriebe und Elektrohübsylinder*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783658031480.

Schmidgruber et al. 2024

Schmidgruber, N.; Smith, A.; Löwe, R.; Schabel, S. & Fleischer, J. (2024), „Investigation on Defects of Battery Pouch Cell Housing“. *2024 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS)*, IEEE, S. 1–5. ISBN: 979-8-3503-8617-2.
<https://doi.org/10.1109/EPTS61482.2024.10586720>.

Schmidgruber, N. 2020

Schmidgruber, N. (2020), *Entwicklung und Programmierung eines frei parametrierbaren Fertigungssystems mit synchronen Servoantrieben*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Schmitt et al. 2014

Schmitt, M.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2014), „Slot die coating of lithium-ion battery electrodes: investigations on edge effect issues for stripe and pattern coatings“, *Journal of Coatings Technology and Research*, 11(1), S. 57–63.
<https://doi.org/10.1007/s11998-013-9498-y>.

Schönemann et al. 2019

Schönemann, M.; Bockholt, H.; Thiede, S.; Kwade, A. & Herrmann, C. (2019), „Multiscale simulation approach for production systems“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5-8), S. 1373–1390.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-3054-y>.

Schreiner et al. 2020

Schreiner, D.; Klinger, A. & Reinhart, G. (2020), „Modeling of the Calendering Process for Lithium-Ion Batteries with DEM Simulation“, *Procedia CIRP*, 93, S. 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.158>.

Seshadri & Pagilla 2010

Seshadri, A. & Pagilla, P. R. (2010), „Optimal Web Guiding“, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 132(1), S. 1–11.
<https://doi.org/10.1115/1.4000074>.

Shi et al. 2017

Shi, C.; Dai, J.; Li, C.; Shen, X.; Peng, L.; Zhang, P.; Wu, D.; Sun, D. & Zhao, J. (2017), „A Modified Ceramic-Coating Separator with High-Temperature Stability for Lithium-Ion Battery“, *Polymers*, 9(5), S. 1–12. <https://doi.org/10.3390/polym9050159>.

Siemens AG 2024

Siemens AG (2024), *LiveTwin Edge App. Funktionshandbuch*.

Siemens PLM Software 2023

Siemens PLM Software (2023), *Simcenter Amesim*.

Spura 2016

Spura, C. (2016), *Technische Mechanik 1. Stereostatik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-14984-0.

Stampatori et al. 2020

Stampatori, D.; Raimondi, P. P. & Noussan, M. (2020), „Li-Ion Batteries: A Review of a Key Technology for Transport Decarbonization“, *Energies*, 13(10), S. 1–23. <https://doi.org/10.3390/en13102638>.

Thomitzek et al. 2022

Thomitzek, M.; Schmidt, O.; Ventura Silva, G.; Karaki, H.; Lippke, M.; Krewer, U.; Schröder, D.; Kwade, A. & Herrmann, C. (2022), „Digitalization Platform for Mechanistic Modeling of Battery Cell Production“, *Sustainability*, 14(3), S. 1–22. <https://doi.org/10.3390/su14031530>.

Ultsch & Lötsch 2015

Ultsch, A. & Lötsch, J. (2015), „Computed ABC Analysis for Rational Selection of Most Informative Variables in Multivariate Data“, *PloS one*, 10(6), S. 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129767>.

VDI 3633 2018

VDI 3633 2018 , *VDI-Richtlinie 3633*, Beuth Verlag, Berlin.

Viehof, M. & Winner, H. 2017

Viehof, M. & Winner, H. (2017), *Stand der Technik und der Wissenschaft: Modellvalidierung im Anwendungsbereich Fahrdynamiksimulation*. Forschungsbericht, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Vuorilehto 2013

Vuorilehto, K. (2013), „Materialien und Funktion“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 21–29.

Wang et al. 2018

Wang, A.; Kadam, S.; Li, H.; Shi, S. & Qi, Y. (2018), „Review on modeling of the anode solid electrolyte interphase (SEI) for lithium-ion batteries“, *npj Computational Materials*, 4(1), S. 1–26. <https://doi.org/10.1038/s41524-018-0064-0>.

Weinmann et al. 2018

Weinmann, H.; Lang, F.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2018), „Bahnzugkraftregelung in der Batteriezellfertigung*/Web tension control in battery cell production“, *wt Werkstattstechnik online*, 108(07-08), S. 519–524. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2018-07-08-37>.

Weinmann, H. W. 2022

Weinmann, H. W. (2022), *Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung*. Dissertation, KIT, Karlsruhe.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000151869>.

Wessel et al. 2021

Wessel, J.; Turetsky, A.; Cerdas, F. & Herrmann, C. (2021), „Integrated Material-Energy-Quality Assessment for Lithium-ion Battery Cell Manufacturing“, *Procedia CIRP*, 98(4), S. 388–393. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.122>.

Whitworth & Harrison 1983

Whitworth, D. & Harrison, M. C. (1983), „Tension variations in pliable material in production machinery“, *Applied Mathematical Modelling*, 7(3), S. 189–196.
[https://doi.org/10.1016/0307-904X\(83\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0307-904X(83)90008-2).

Wu 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>.

Zhang 2007

Zhang, S. S. (2007), „A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries“, *Journal of Power Sources*, 164(1), S. 351–364.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.065>.

Zhang et al. 2022

Zhang, Y. S.; Courtier, N. E.; Zhang, Z.; Liu, K.; Bailey, J. J.; Boyce, A. M.; Richardson, G.; Shearing, P. R.; Kendrick, E. & Brett, D. J. L. (2022), „A Review of Lithium-Ion Battery Electrode Drying: Mechanisms and Metrology“, *Advanced Energy Materials*, 12(2), S. 1–19. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102233>.

Zhu et al. 2021

Zhu, G.-L.; He, Y.-Y.; Deng, Y.-L.; Wang, M.; Liu, X.-Y.; Wang, L.-P. & Gao, J. (2021), „Dependence of Separator Thickness on Li-Ion Battery Energy Density“, *Journal of The Electrochemical Society*, 168(11), S. 1–7.

<https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac39df>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batteriezelle (in Anlehnung an (Leuthner 2013))	6
Abbildung 2-2: Vereinfachte Darstellung der Zelltypen (in Anlehnung an (Bach 2017))	8
Abbildung 2-3: Vereinfachte Darstellung der Verbundbauweisen (in Anlehnung an (Mooy 2019))	9
Abbildung 2-4: Beispielhafte Gesamtprozesskette zur Herstellung von Pouch-Zellen (in Anlehnung an (Kampker et al. 2015; Weinmann 2022))	10
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Beschichtungs- und Trocknungsprozesses (in Anlehnung an (Weinmann 2022))	12
Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des Kalandrierprozesses (in Anlehnung an (Meyer et al. 2017))	13
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Vereinzelung und Stapelbildung (in Anlehnung an (Weinmann 2022))	15
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung einer Vereinzelungsmaschine mittels Stanzwerkzeug (in Anlehnung an (Weinmann 2022))	16
Abbildung 2-9: Schematische Darstellung einer Stapelmaschine mit statischer Stapelstation	17
Abbildung 2-10: Anzahl patentierter Maschinenkonzepte für die Stapelbildung	19
Abbildung 2-11: Mögliche Klassifizierung digitaler Modelle / digitaler Zwillinge (eigene Abbildung in Anlehnung an (Henschel et al. 2023; Overbeck 2023))	23
<i>Abbildung 2-12: Modellentwicklungstätigkeiten im Kontext der Batterieproduktion</i>	25
Abbildung 2-13: Potenziale digitaler Maschinenmodelle für die Entwicklung und Inbetriebnahme/Einrichtung (in Anlehnung an (Lechler et al. 2019))	28
Abbildung 3-1: Vorgehensweise	33
Abbildung 4-1: Anwendungsfälle der zu entwickelnden Modelle	35

Abbildung 4-2: Maschinenkonzepte: Flexibles Vereinzelungsmodul Coil2Stack (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2022b)), Gesamtanlagenkonzept EXINOS (links) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))	37
Abbildung 4-3: Gesamtanlagenkonzept EXINOS (Bild: KIT/ Bramsiepe)	38
Abbildung 4-4: Flexibles Vereinzelungsmodul Coil2Stack (links), flexibles Handhabungssystem (rechts) (in Anlehnung an (Weinmann 2022))	39
Abbildung 4-5: Z-Falt-Stapelmaschine: Realsystem (links), Konzept (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024b))	40
Abbildung 4-6: Anteile der Haupteinflussfaktoren und Anteile der Prozesse auf die Fehler in einem Zellstapel	44
Abbildung 4-7: Auswertung der FMEA	45
Abbildung 4-8: Bahnzugverläufe (links) und Längenabweichung (rechts) (in Anlehnung an (Kollenda et al. 2023))	47
Abbildung 4-9: Streuung der Bahnzugverläufe und Maßhaltigkeiten (in Anlehnung an (Kollenda et al. 2023))	47
Abbildung 4-10: Zugkraft-Dehnungsdiagramm von Separatoren (links) und Probenbeschaffenheit (rechts) (in Anlehnung an (A_Boschert 2023))	49
Abbildung 4-11: Qualitative Darstellung der Funktionsstruktur inkl. Komponenten	50
Abbildung 4-12: Analyse der Funktionsstruktur des flexiblen Vereinzelungsmoduls	51
Abbildung 4-13: Analyse der Funktionsstruktur der Z-Falt-Stapelmaschine (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024b))	52
Abbildung 5-1: Vorgehensweise zur Identifikation und Bewertung der zu modellierenden Aspekte	55
Abbildung 5-2: Design Structure Matrix der Z-Falt-Stapelmaschine	56
Abbildung 5-3: Detaillierungsgrade für die Modellierung – Kategorisierung der Komponenten	60
Abbildung 5-4: Qualitative Unterscheidung der Detaillierungsgrade	63
Abbildung 6-1: Überführung eines Bahnsegments k in ein eindimensionales Modell zwischen den Punkten i und $i+1$	66

Abbildung 6-2: Umlenkung der Bahn um eine Rolle	69
Abbildung 6-3: Schematische Darstellung einer bewegten Masse mit Reibung (in Anlehnung an (Spura 2016))	71
Abbildung 6-4: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Kugelgewindespindel	72
Abbildung 6-5: Schematische Darstellung eines Riementriebs	73
Abbildung 6-6: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Antriebsbausteine	74
Abbildung 6-7: Vereinfachte Darstellung eines Pneumatikzylinders (in Anlehnung an (Ilchmann et al. 2006))	75
Abbildung 6-8: Struktureller Modellaufbau des flexiblen Vereinzelungsmoduls – links: reales System (in Anlehnung an (Weinmann 2022)), rechts: Auszug Simulationsmodell (in Anlehnung an (A_Maibaum 2022))	76
Abbildung 6-9: Funktionsweise des Modells des flexiblen Vereinzelungsmoduls	77
Abbildung 6-10: Parameterauszug – flexibles Vereinzelungsmodul	78
Abbildung 6-11: Kurvenscheiben in Abhängigkeit von der gewählten Elektrodenblattlänge bei einer Bahngeschwindigkeit von 12 mm/s (in Anlehnung an (Schmidgruber 2020))	79
Abbildung 6-12: Auszug Modellbaustein „PLMWINDER“	79
Abbildung 6-13: Struktureller Modellaufbau der Z-Falt-Stapelmaschine – links: reales System, rechts: Auszug Simulationsmodell (in Anlehnung an (A_Boschert 2023))	80
Abbildung 6-14: Parameterauszug – Z-Falt-Stapelmaschine	81
Abbildung 6-15: Zusammenhang der Steuerungslogik, Zykluszeit und mittleren Tischgeschwindigkeit (in Anlehnung an (A_Boschert 2023))	82
Abbildung 6-16: Position und Geschwindigkeit des Stapeltisches	82
Abbildung 7-1: Vorgehensweise zur Modellparametrierung	84
Abbildung 7-2: Vereinfachte Schnittansicht einer Umlenkrolle	85
Abbildung 7-3: Aufgenommene Linienlast (LFP-Kathode) bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden	88

Abbildung 7-4: Durchschnittliche Linienlasten bei unterschiedlichen Verdichtungsgraden	89
Abbildung 7-5: Versuchsaufbau zur Zugprüfung	90
Abbildung 7-6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der LFP-Kathode (10 % Verdichtung)	90
Abbildung 7-7: Ermittelte E-Module der Elektrodenmaterialien	91
Abbildung 7-8: Ermittelte Dehngrenzen der Elektrodenmaterialien	92
Abbildung 7-9: Versuchsaufbau zur Reibwertprüfung	93
Abbildung 7-10: Reibungskoeffizienten zwischen NMC622-Kathode (10 % Verdichtung) und CFK	94
Abbildung 7-11: Ermittelte Reibungskoeffizienten der Elektroden (CFK)	94
Abbildung 7-12: Ermittelte Reibungskoeffizienten der Elektroden (Aluminium)	95
Abbildung 7-13: Auswertung der gemessenen E-Module (links) und der Dehngrenzen (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024b))	97
Abbildung 7-14: Ermittelte Reibungskoeffizienten für die Separatoren bei CFK- (links) und Aluminiumoberfläche (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024b))	98
Abbildung 7-15: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Rundlaufgenauigkeit	99
Abbildung 7-16: Gemessene Rundlaufgenauigkeit in Polarkoordinaten (links) und kartesischem Koordinatensystem (rechts)	100
Abbildung 8-1: Versuchsaufbau am flexiblen Vereinzelungsmodul	104
Abbildung 8-2: Parameterkombinationen der vollfaktoriellen Untersuchung an dem flexiblen Vereinzelungsmodul	104
Abbildung 8-3: Versuchsaufbau an der Z-Falt-Stapelmaschine	105
Abbildung 8-4: Parameterkombinationen der vollfaktoriellen Untersuchung an der Z-Falt-Stapelmaschine	105
Abbildung 8-5: Beispielergebnisse der Modellvalidierung an dem flexiblen Vereinzelungsmodul	107
Abbildung 8-6: Beispielergebnisse der Modellvalidierung an der Z-Falt-Stapelmaschine	113

Abbildung 9-1: Vereinfachte Darstellung der Regelungsstrategien des Bahnzugs (in Anlehnung an (Husseini et al. 2022a))	120
Abbildung 9-2: Standardabweichung der modellierten und gemessenen Bahnzugdaten (in Anlehnung an (Husseini et al. 2022a))	121
Abbildung 9-3: Simulation und Messung der Regleroptimierung	123
Abbildung 9-4: Simulierter Bahnzug in Abhängigkeit von verschiedenen Elektroden	124
Abbildung 9-5: Modellierte Einflüsse der Bahngeschwindigkeit und des Soll-Bahnzugs auf die Bahnzugschwankungen	127
Abbildung 9-6: Modellierte Einflüsse der Bahngeschwindigkeit und der Elektrodenblattlänge auf die Bahnzugschwankungen	128
Abbildung 9-7: Simulierter Bahnzug in Abhängigkeit von verschiedenen Separatoren	130
Abbildung 9-8: Modellierte Einflüsse der mittleren Tischgeschwindigkeit und des Zylinderdrucks auf den maximalen Bahnzug	132
Abbildung 9-9: Zusammenhang zwischen Bahnzug und Tänzerposition	133
Abbildung 9-10: Bahnkantenregelung mittels Drehrahmen (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))	134
Abbildung 9-11: Schnittstellen und Kopplung des Drehrahmenmodells (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))	136
Abbildung 9-12: Eingangswerte für das Modell des Drehrahmens – Bahnzug und Bahngeschwindigkeit (links), laterale Verschiebung (rechts) (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))	136
Abbildung 9-13: Standardabweichung der lateralen Verschiebung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Reglerparametern (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))	138
Abbildung 9-14: Laterale Verschiebungen und Verstellweg (in Anlehnung an (Husseini et al. 2024a))	138
Abbildung 9-15: Vereinfachte Darstellung zur Kopplung des Modells mit der Maschinensteuerung	140

Abbildung 9-16: Beispielhafter Vergleich der Werte des Simulationsmodells und des ROM (in Anlehnung an (Husseini et al. 2022b; A_Maibaum 2022))	141
---	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Auszug neuer Maschinenkonzepte in der Forschungslandschaft	20
Tabelle 2-2: Gängige Modellierungsverfahren für Produktionsmaschinen	29
Tabelle 4-1: FMEA-Analyse	42
Tabelle 4-2: Material- und Maschinenparameter	46
Tabelle 5-1: Auszug der Ergebnisse der DSM-Analyse	57
Tabelle 5-2: Bewertungskriterien und ihre Gewichtung	58
Tabelle 5-3: Auszug: Gesamtbewertung der Komponenten	59
Tabelle 7-1: Auszug recherchierter Reibwerte und Wirkungsgrade	85
Tabelle 7-2: Eigenschaften der unkalandrierten Elektroden	87
Tabelle 7-3: Eigenschaften der kalandrierten Elektroden	87
Tabelle 7-4: Durchschnittliche E-Module und Dehngrenzen der Elektroden	92
Tabelle 7-5: Reibungskoeffizienten der Elektroden	96
Tabelle 7-6: Mittelwerte der E-Module und Dehngrenzen der Separatoren	98
Tabelle 7-7: Reibungskoeffizienten der Separatoren	98
Tabelle 7-8: Gemessene Exzentrizitätswerte der Umlenkrollen	101
Tabelle 8-1: Ergebnisse Modellvalidierung: flexibles Vereinzelungsmodul	108
Tabelle 8-2: Auswirkungen gewählter Parameter auf die Modellgüte (flexibles Vereinzelungsmodul)	112
Tabelle 8-3: Ergebnisse Modellvalidierung: Z-Falt-Stapelmaschine	114
Tabelle 8-4: Auswirkungen gewählter Parameter auf die Modellgüte (Z-Falt-Stapelmaschine)	117
Tabelle 9-1: Reglerparameter des Drehrahmenmodells	137

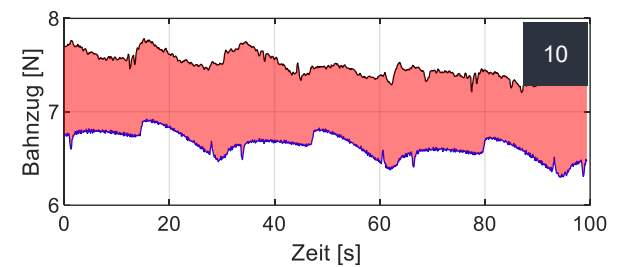
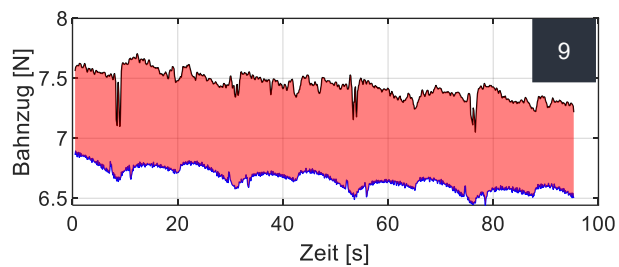
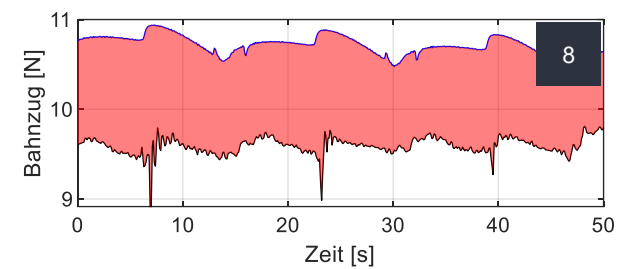
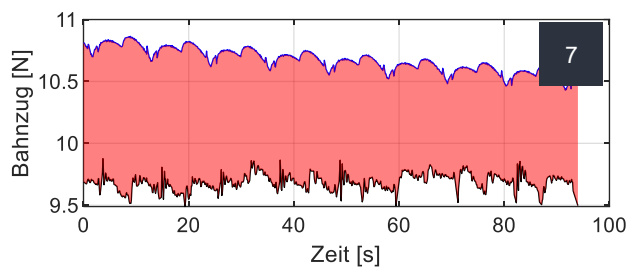
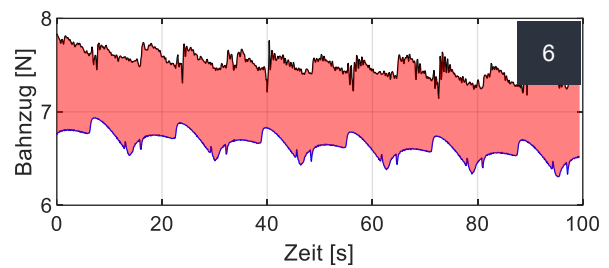
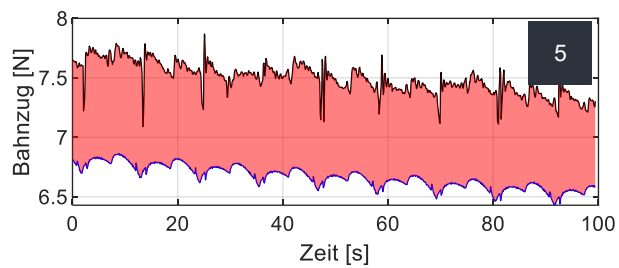
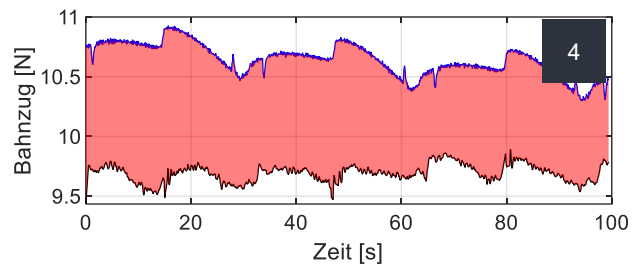
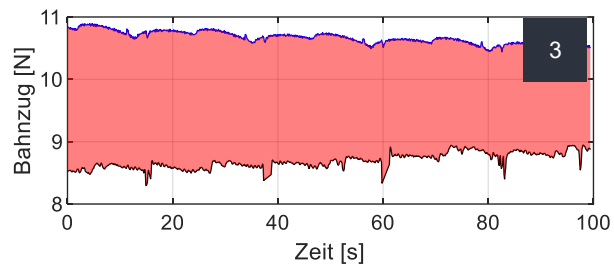
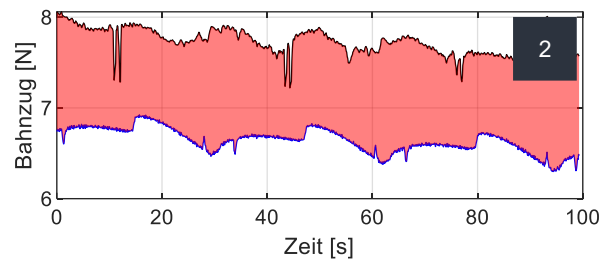
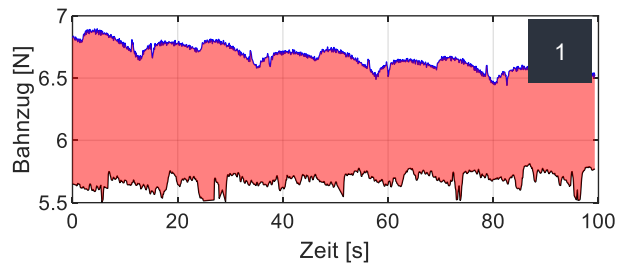
Anhang

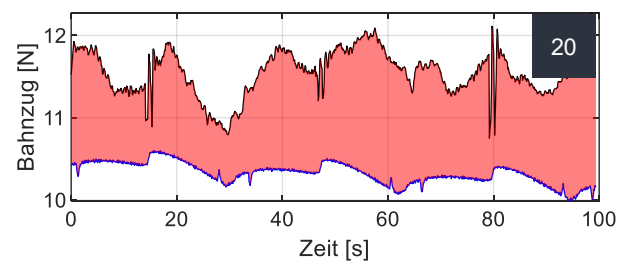
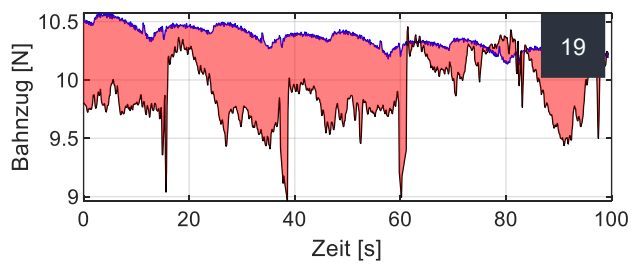
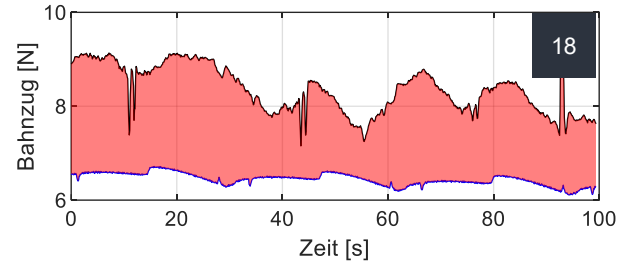
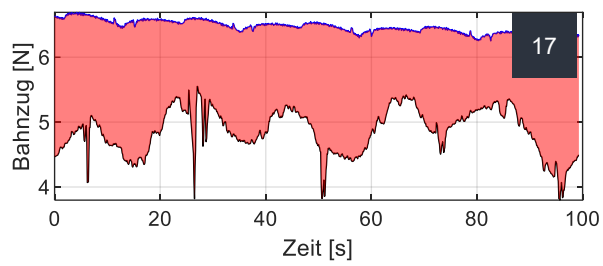
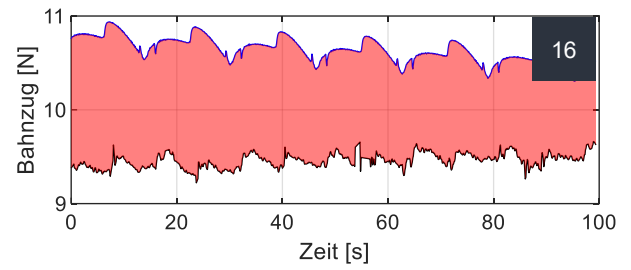
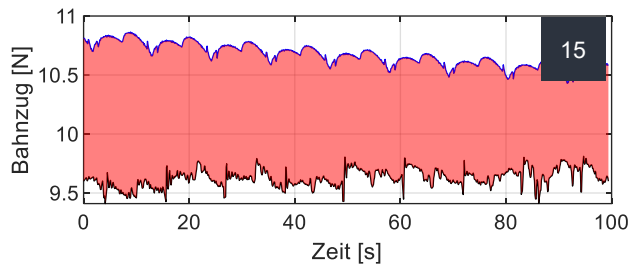
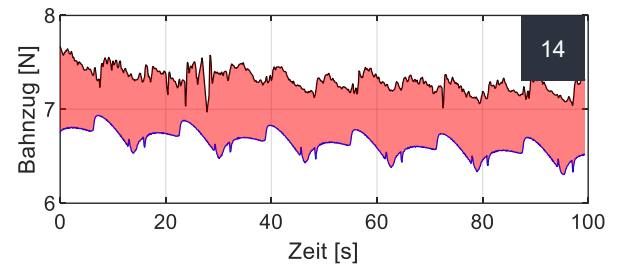
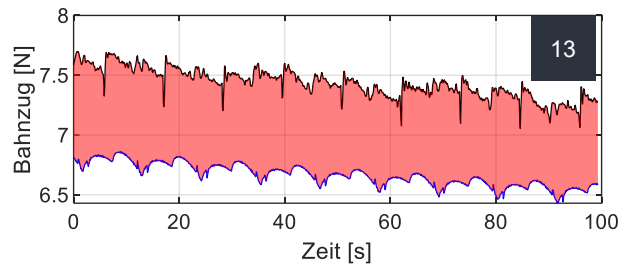
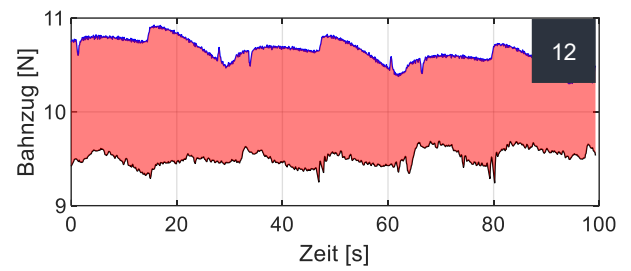
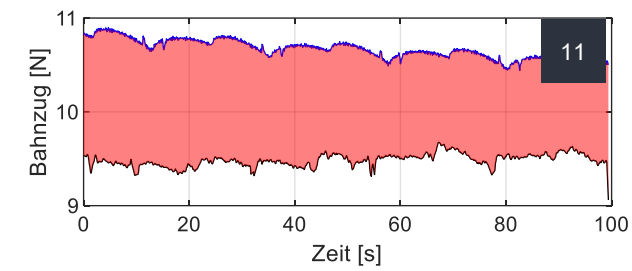
Anhang A: Gesamtbewertung und Einteilung der Komponenten

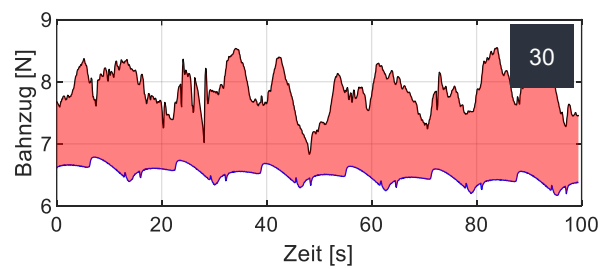
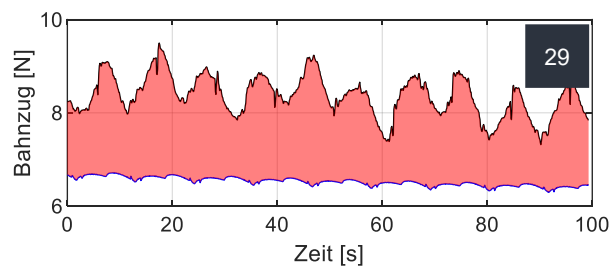
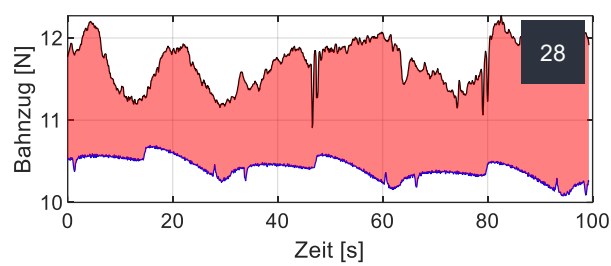
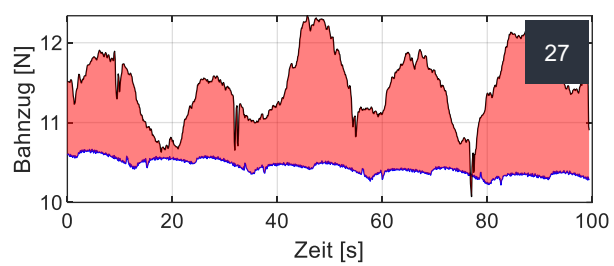
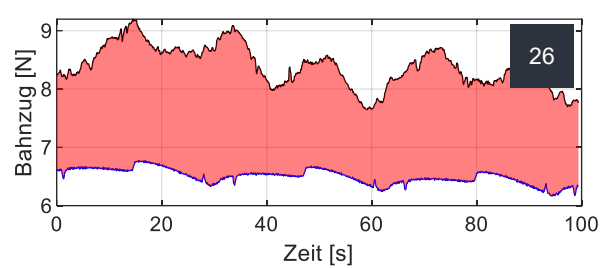
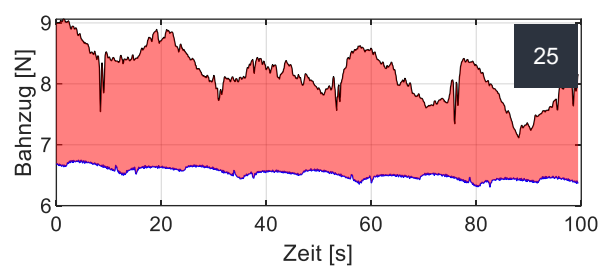
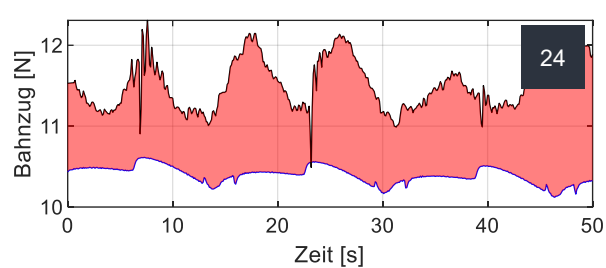
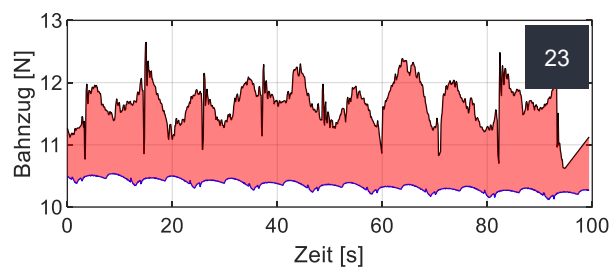
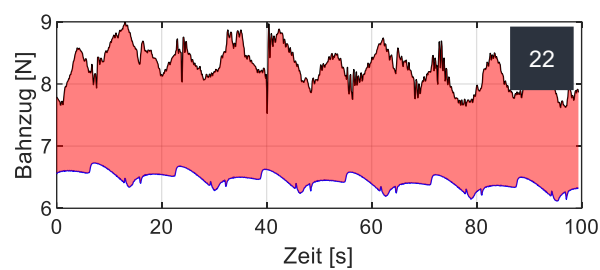
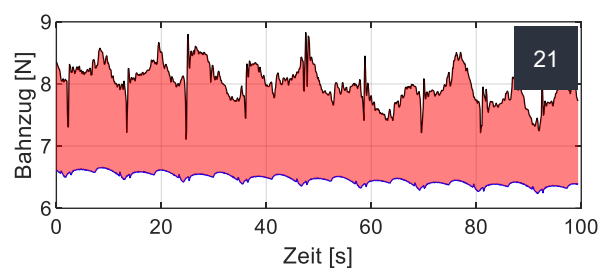
Nr.	Flexibles Vereinzelungsmodul					Z-Falt-Stapelmaschine				
	Bezeichnung	Typ	B_{ges}	Kumuliert [%]	Kategorie	Bezeichnung	Typ	B_{ges}	Kumuliert [%]	Kategorie
K1	Antrieb Abwickler (Rotation)	A	84,00	14,55	ME	Antrieb - Stapeltisch (Horizontal)	A	44,56	11,77	ME
K2	Elektrodenbahn	A	84,00	29,11	MAT	Stapeltisch	A	44,56	23,55	M
K3	Abwickler inkl. Coil	A	54,00	38,46	M	Abwickler (inkl. Coil)	A	37,03	33,33	M
K4	Umlenkrollen	A	48,00	46,78	M	Umlenkrollen (ohne Tänzer und Outfeed)	A	32,09	41,81	M
K5	Proportional Regelventil	A	44,01	54,40	P	Antrieb - Abwickler (Rotation)	A	29,43	49,59	ME
K6	Druckluftzylinder Materialspeicher	A	44,01	62,03	P	Druckluftzylinder Tänzer	A	27,47	56,85	P
K7	Antrieb Handhabungssystem - Vertikal	A	29,62	67,16	ME	Umlenkrolle Tänzer	A	23,54	63,07	M
K8	Antrieb Handhabungssystem - Rotation	A	27,80	71,98	ME	Mechanischer Hebel bzw. Rotationseinheit - Tänzer	A	17,66	67,73	P
K9	Wegaufnehmer	A	18,84	75,24	EI	Riementrieb - Abwickler	A	17,66	72,40	M
K10	Riementrieb Handhabungssystem - Vertikal	A	17,97	78,35	M	Separator	A	17,28	76,96	MAT
K11	Spindel Handhabungssystem - Vertikal	B	17,97	81,47	M	Drehgeber - Tänzer	B	11,77	80,07	EI
K12	Handhabungssystem Grundplatte	B	17,77	84,55	M	Linearführung - Stapeltisch	B	8,71	82,38	M
K13	Riementrieb Handhabungssystem Rotation	B	12,58	86,73	M	Spindel - Antrieb Stapeltisch (Horizontal)	B	8,71	84,68	M
K14	Drehrahmen	B	12,30	88,86	ME	Antrieb - Stapeltisch (Vertikal)	B	7,52	86,66	ME
K15	Messwalze	B	12,00	90,94	EI	Druckluftzylinder - Klemmfinger Kathode	B	6,84	88,47	P
K16	Linearführung Materialspeicher	B	11,85	92,99	M	Druckluftzylinder - Klemmfinger Anode	B	6,84	90,28	P
K17	Vakuumgreifer 1	B	8,00	94,37	P	Klemmfinger Kathode	B	6,27	91,93	M
K18	Vakuumgreifer 2	C	8,00	95,76	P	Klemmfinger Anode	B	6,27	93,59	M
K19	Vakuumgreifer 3	C	8,00	97,15	P	Umlenkrolle - Paar	B	4,11	94,68	M

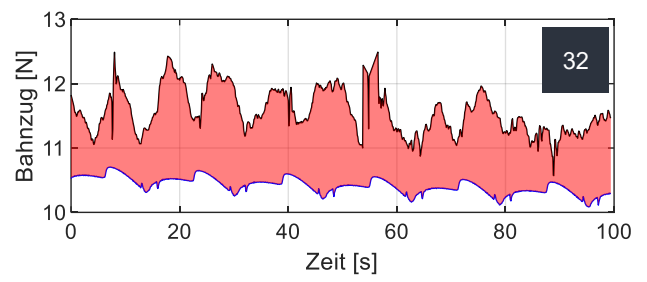
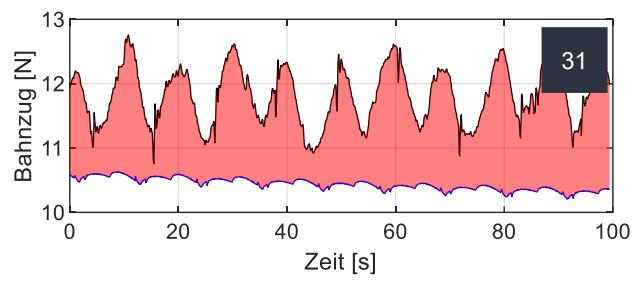
Nr.	Flexibles Vereinzelungsmodul					Z-Falt-Stapelmaschine				
	Bezeichnung	Typ	B_{ges}	Kumuliert [%]	Kategorie	Bezeichnung	Typ	B_{ges}	Kumuliert [%]	Kategorie
K20	Controller Drehrahmen	C	6,78	98,32	EI	Spindelhubgetriebe Stapeltisch	C	3,34	95,56	M
K21	Stellantrieb Drehrahmen	C	6,27	99,41	ME	Linearführung Stellantrieb	C	3,04	96,36	M
K22	Bahnkanten-sensor	C	3,42	100	EI	Spindel - Stellantrieb - Abwickler	C	3,04	97,16	M
K23	Vakuumerzeuger 3	C	0,00	100	P	Stellantrieb Abwickler zur Bahnkantenregelung	C	1,52	97,56	ME
K24	Antrieb Ablegetisch - Horizontal	C	0,00	100	ME	Antrieb - Kathodengreifer	C	1,33	97,92	ME
K25	Ablegetisch	C	0,00	100	M	Antrieb - Anodengreifer	C	1,33	98,27	ME
K26	Lineareinheit Vakuumgreifer 1	C	0,00	100	M	Vakuumgreifer Kathode 1	C	1,15	98,57	P
K27	Lineareinheit Vakuumgreifer 2	C	0,00	100	M	Vakuumgreifer Anode 1	C	1,15	98,88	P
K28	Lineareinheit Vakuumgreifer 3	C	0,00	100	M	Vakuumgreifer Kathode 2	C	1,06	99,16	P
K29	Spindel Ablegetisch - Horizontal	C	0,00	100	M	Vakuumgreifer Anode 2	C	1,06	99,44	P
K30	Linearführung Ablegetisch - Horizontal	C	0,00	100	M	Linearführung Kathodengreifer	C	0,53	99,58	M
K31	Antrieb Vakuumgreifer 1	C	0,00	100	ME	Spindel - Kathodengreifer	C	0,53	99,72	M
K32	Vakuumerzeuger 1	C	0,00	100	P	Linearführung Anodengreifer	C	0,53	99,86	M
K33	Antrieb Vakuumgreifer 2	C	0,00	100	ME	Spindel - Anodengreifer	C	0,53	100	M
K34	Vakuumerzeuger 2	C	0,00	100	P	Schaltventile Greifer Kathode	C	0,00	100	P
K35	Antrieb Vakuumgreifer 3	C	0,00	100	ME	Schaltventile Greifer Anode	C	0,00	100	P
K36	Antrieb Ablegetisch - Vertikal	C	0,00	100	ME	Kathodenblätter	C	0,00	100	MAT
K37	Spindel Ablegetisch - Vertikal	C	0,00	100	M	Anodenblätter	C	0,00	100	MAT
K38						Schaltventile - Klemmfinger	C	0,00	100	P
K39						Druckluftzylinder Tänzer Kathode 2	C	0,00	100	P
K40						Druckluftzylinder Tänzer Anode 2	C	0,00	100	P
K41						Druckluftzylinder Tänzer Kathode 1	C	0,00	100	P
K42						Druckluftzylinder Tänzer Anode 1	C	0,00	100	P

Nr.	Flexibles Vereinzelungsmodul					Z-Falt-Stapelmaschine				
	Bezeichnung	Typ	B_{ges}	Kumuliert [%]	Kategorie	Bezeichnung	Typ	B_{ges}	Kumuliert [%]	Kategorie
K43						Magazin - Kathodenblätter	C	0,00	100	MAT
K44						Vakuumerzeuger Greifer Kathode 2	C	0,00	100	P
K45						Vakuumerzeuger Greifer Kathode 1	C	0,00	100	P
K46						Ausrichttisch Kathode	C	0,00	100	M
K47						Magazin - Anodenblätter	C	0,00	100	MAT
K48						Vakuumerzeuger Greifer Anode 2	C	0,00	100	P
K49						Vakuumerzeuger Greifer Anode 1	C	0,00	100	P
K50						Ausrichttisch Anode	C	0,00	100	M

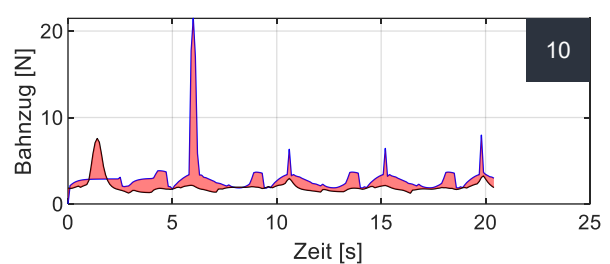
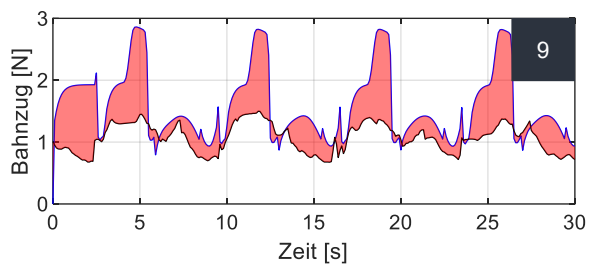
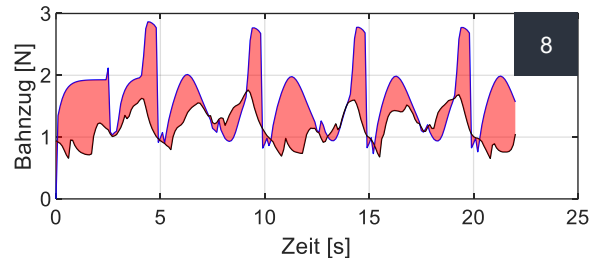
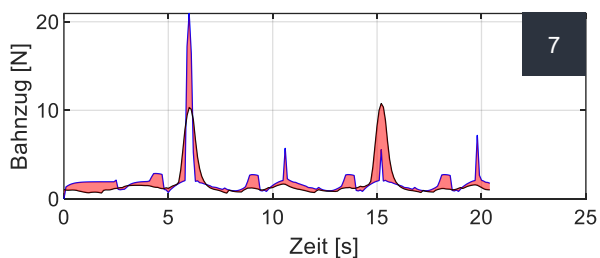
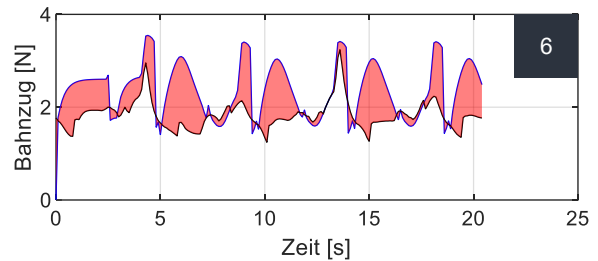
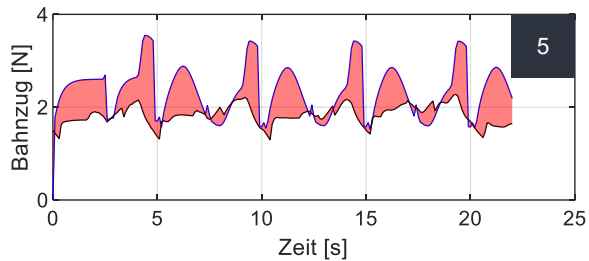
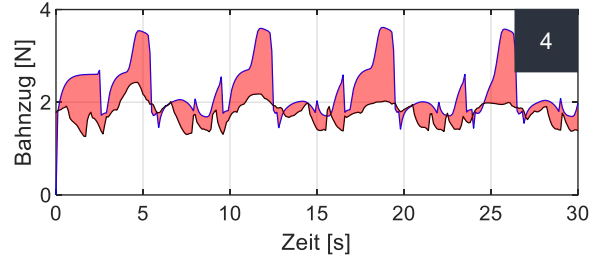
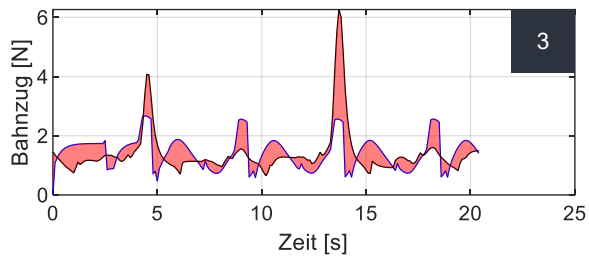
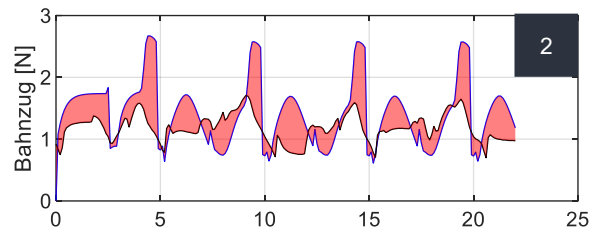
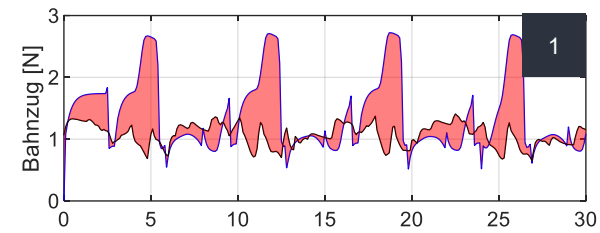
Anhang B: Ergebnisse der Modellvalidierung am flexiblen Vereinzelungsmodul

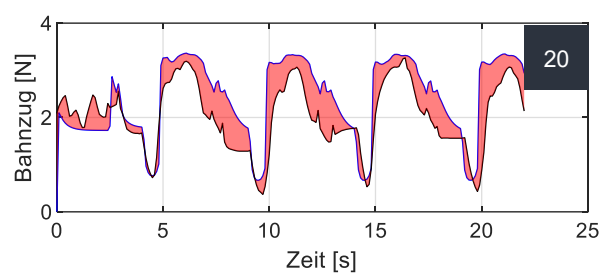
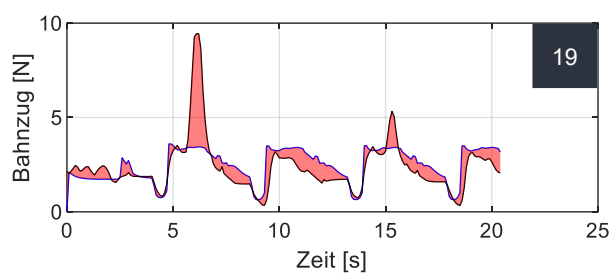
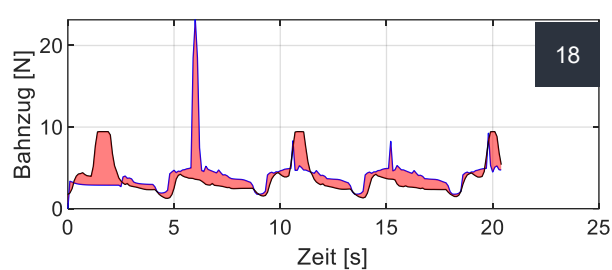
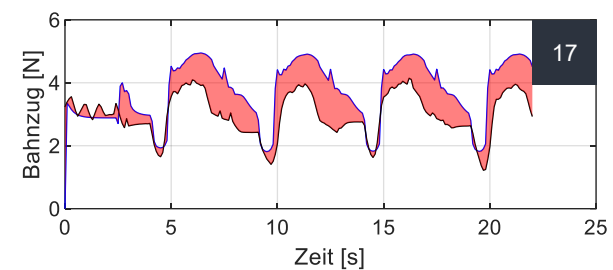
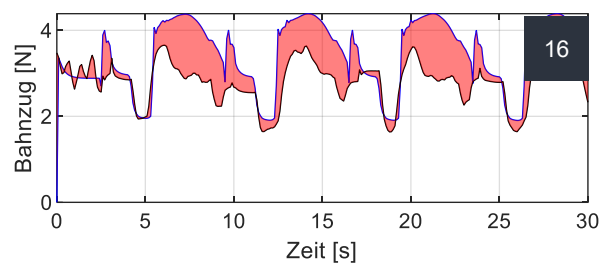
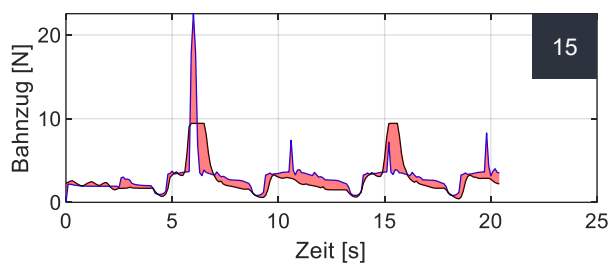
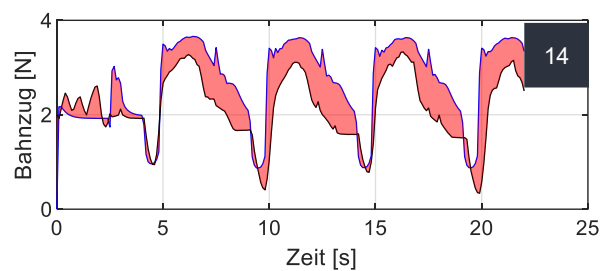
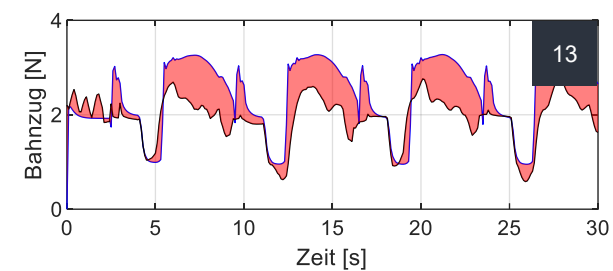
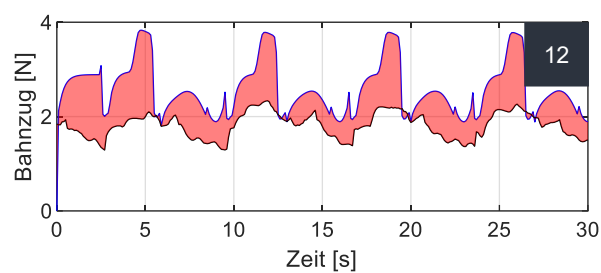
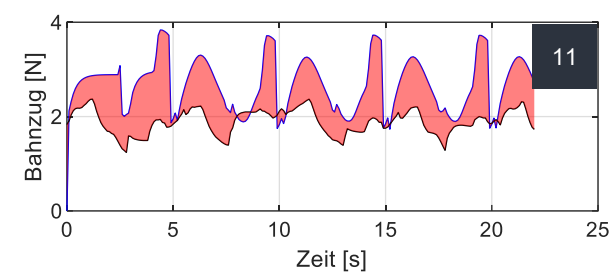


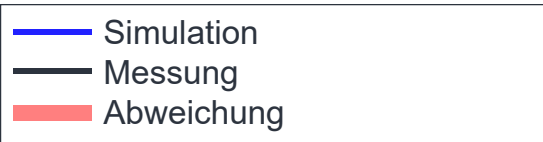
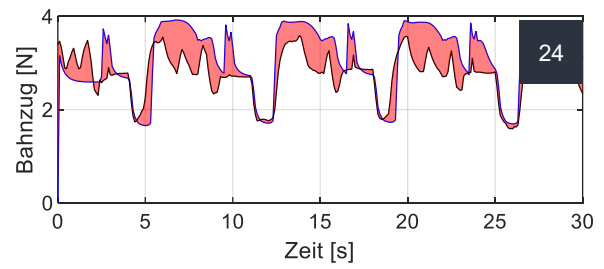
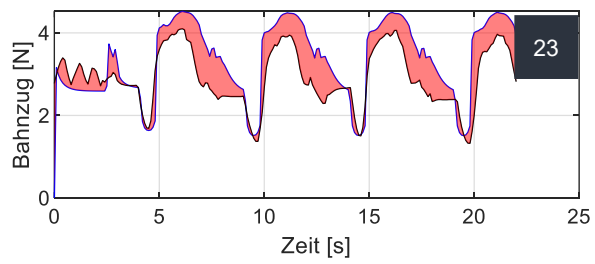
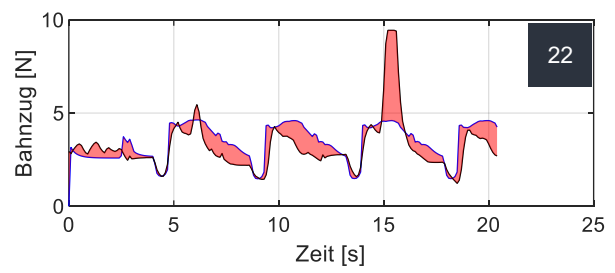
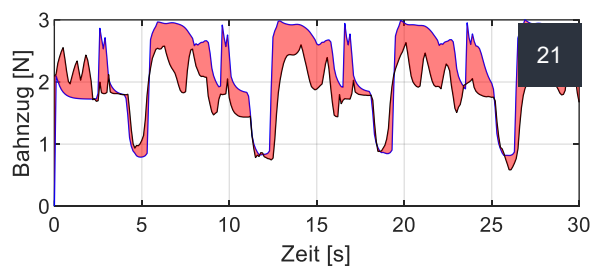




— Simulation
— Messung
Abweichung

Anhang C: Ergebnisse der Modellvalidierung an der Z-Falt-Stapelmaschine





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

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten
Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozessessteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsigen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein 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 Mauerwerkabaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. WirtschaftsIng. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver 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 Qualitäts-
methodenverbund 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 Fünfsachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlen-
unterstützte CAM-Umgebung**

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas 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
Abrasivstrahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph 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 Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspannbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für µMIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin 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

Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

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

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

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

