

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

Sebastian Haag

**Entwicklung eines Verfahrensablaufes  
zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit  
großformatigem, rechteckigem Stapelformat  
und kontinuierlichen Materialbahnen**

Band 237

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

Sebastian Haag

**Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur  
Herstellung von Batteriezellstapeln mit  
großformatigem, rechteckigem Stapelformat und  
kontinuierlichen Materialbahnen**

Band 237



# **Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
der KIT-Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**  
von

Dipl.-Ing. Sebastian Haag

Tag der mündlichen Prüfung: 20.07.2020  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz

**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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7649-3

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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 soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. 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



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferats und das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die Förderung während meiner Tätigkeit als Gruppenleiter. Seine Unterstützung und die offenen Diskussionen haben wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Des Weiteren bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz für die Übernahme des Korreferats. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, insbesondere meinen Kolleginnen und Kollegen im Bereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung danke ich für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit. Besonderer Dank gilt der Gruppe Elektromobilität für die schöne gemeinsame Zeit und die großartige Arbeitsatmosphäre.

Mein größter Dank gilt meiner Familie für das entgegengebrachte Verständnis sowie die fortwährende Aufmunterung und Motivation. Ohne diese Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Karlsruhe, im Juli 2020

Sebastian Haag



## **Abstract**

From the increasing electrification of the drive train in the automotive industry and the ongoing developments in energy transition arises the need for efficient and powerful energy storage systems. Electrochemical energy storage systems such as lithium-ion batteries offer a promising solution to achieving those requirements.

One major challenge for the production of large-sized Li-ion batteries is the assembly of the stack, i.e. the alternating arrangement of anode, separator and cathode. The choice of method for the stack assembly has a major impact on the viable stack designs and hence on the properties of the battery cell. For current large-sized battery cells, a battery cell stack with single sheet stacking has the best characteristics. However, this method of stack assembly also has several disadvantages, e.g. that it leads to the formation of cut particles and stamped grid scraps.

Therefore, the aim of this work is to develop a stack design that combines the positive characteristics of single sheet stacking cells with the advantages of a continuous material web. The quintessential part is the conceptional design of an assembly method for the production of a defined stack design.

First, the stack design is devised, based on several target criterions. Subsequently follows a qualitative analysis of the interrelationships of the stack design in order to define a suitable production process for the devised stack design. Due to the fact that currently no suitable procedure exists for the step of shaping the material web, a new procedure is devised. Finally, the new procedure is implemented, and a prototype is constructed. Thus, a new and more efficient procedure for assembling cell stacks for Li-ion batteries has been developed.



# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>   | <b>I</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivation  | 1         |
| 1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit  | 2         |
| <b>2 Stand der Forschung und Technik</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1 Funktionsprinzip und Bauformen von Li-Ionen Batteriezellen                        | 3         |
| 2.1.1 Funktionsprinzip von Li-Ionen Batteriezellen                                    | 3         |
| 2.1.2 Bauformen von Li-Ionen Batteriezellen   | 9         |
| 2.2 Produktionsprozess von Li-Ionen Batteriezellen                                    | 12        |
| 2.2.1 Elektrodenfertigung   | 13        |
| 2.2.2 Zusammenbau der Zelle   | 15        |
| 2.2.3 Aktivieren der Zelle  | 18        |
| 2.2.4 Zusammenfassung Produktionsprozess von Li-Ionen Batteriezellen                  | 19        |
| 2.3 Stapelbildungsverfahren   | 20        |
| 2.3.1 Anforderungen Stapeldesign  | 20        |
| 2.3.2 Anforderungen Stapelbildungsverfahren   | 22        |
| 2.3.3 Einzelblattstapeln  | 24        |
| 2.3.4 Z-Falten  | 29        |
| 2.3.5 Z-Falten mit Einzelblättern   | 31        |
| 2.3.6 Rundwickeln   | 35        |
| 2.3.7 Flachwickeln  | 37        |
| 2.3.8 Stackwinding  | 39        |
| 2.3.9 Weitere Stapelbildungsverfahren   | 41        |
| 2.4 Zusammenfassung und Defizite Stand der Forschung und Technik                      | 42        |
| 2.4.1 Zusammenfassung Stand der Forschung und Technik                                 | 42        |
| 2.4.2 Defizite Stand der Forschung und Technik und daraus abgeleitete Fragestellungen | 44        |
| <b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>   | <b>46</b> |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.1      | Zielsetzung  | 46        |
| 3.2      | Vorgehensweise   | 47        |
| <b>4</b> | <b>Konzeption eines kontinuierlichen Stapeldesigns</b>                           | <b>49</b> |
| 4.1      | Kriterien für den Stapelaufbau   | 49        |
| 4.2      | Konzeptionierung Stapeldesign  | 51        |
| 4.2.1    | Merkmale Stapeldesign  | 51        |
| 4.2.2    | Konzepte Stapeldesign  | 53        |
| 4.3      | Zusammenfassung der Konzeption eines Stapeldesigns                               | 60        |
| <b>5</b> | <b>Definition Stapelbildungsablauf und Analyse Verfahren zur Richtungsumkehr</b> | <b>62</b> |
| 5.1      | Kriterien für die Stapelbildung  | 63        |
| 5.2      | Stapelbildungsablauf   | 64        |
| 5.3      | Qualitative Beschreibung der Wirkzusammenhänge                                   | 72        |
| 5.4      | Analyse Verfahren zur 180°-Richtungsumkehr                                       | 79        |
| 5.4.1    | Kriterien der 180°-Richtungsumkehr   | 81        |
| 5.5      | Materialformungen des Separators beim Z-Falten                                   | 84        |
| 5.6      | Analogiebildung aus Anwendungsfällen der Blechverarbeitung                       | 87        |
| 5.6.1    | Freies Biegen  | 88        |
| 5.6.2    | Gesenkbiegen   | 89        |
| 5.6.3    | Schwenkbiegen  | 90        |
| 5.6.4    | Streckziehen   | 91        |
| 5.6.5    | 180°-Biegen von Fein- und Mittelblechen  | 92        |
| 5.6.6    | Falzen   | 94        |
| 5.7      | Analogiebildung aus Anwendungsfällen der Papierverarbeitung                      | 95        |
| 5.7.1    | Taschenfalz  | 95        |
| 5.7.2    | Schwertfalz  | 96        |
| 5.7.3    | Trichterfalz   | 96        |
| 5.7.4    | Trommelfalz  | 97        |
| 5.8      | Bewertung bestehender Verfahren zur 180°-Richtungsumkehr                         | 98        |

---

|          |  |             |
|----------|--|-------------|
| 5.9      | Zusammenfassung Definition Stapelbildungsablauf und Analyse Verfahren zur 180°-Richtungsumkehr | 99          |
| <b>6</b> | <b>Entwicklung Verfahrensablauf</b>  | <b>101</b>  |
| 6.1      | Definition der Prozessschritte des Faltungsablaufes  | 101         |
| 6.2      | Parametrisierte Materialbahnverläufe   | 120         |
| 6.3      | Zusammenfassung Entwicklung Verfahrensablauf   | 135         |
| <b>7</b> | <b>Validierung</b>   | <b>136</b>  |
| 7.1      | Vorliegendes Zellstapeldesign  | 137         |
| 7.2      | Konzeptionierung Faltungskomponenten   | 141         |
| 7.2.1    | Ableitung Stützstellen/Komponentenpositionen/-bereiche   | 141         |
| 7.2.2    | Technologieauswahl   | 146         |
| 7.2.3    | Konzeption Komponenten   | 155         |
| 7.2.4    | Konstruktive Ausgestaltung der Werkzeugkomponenten   | 163         |
| 7.3      | Konzeption Materialbahnzuführung   | 166         |
| 7.3.1    | Konzeption Abwicklung und konstante Bahnspannungserzeugung                                     | 168         |
| 7.3.2    | Konzeption Bahnförderung   | 171         |
| 7.4      | Zusammenfassung Konzeptionierung   | 171         |
| 7.5      | Prototypische Umsetzung Materialbahnförderung  | 172         |
| 7.5.1    | Steuerung der Materialbahnförderung  | 172         |
| 7.5.2    | Materialbahnförderung  | 175         |
| 7.6      | Prototypische Umsetzung Faltungsablauf   | 177         |
| 7.7      | Zusammenfassung Prototypische Umsetzung  | 182         |
| <b>8</b> | <b>Bewertung Stapeldesign und Verfahren</b>  | <b>184</b>  |
| <b>9</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>  | <b>191</b>  |
| 9.1      | Zusammenfassung  | 191         |
| 9.2      | Ausblick   | 192         |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>   | <b>I</b>    |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>VIII</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>IX</b>   |







# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Aufgrund der verschärften Gesetzgebung für die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Automobilen rücken in der Automobilindustrie verstärkt alternative Antriebskonzepte zum konventionellen Verbrennungsmotor in den Fokus. Ein Ansatz, der vermehrt weiterverfolgt wird, ist die Elektrifizierung des Antriebsstranges, sei es durch die Verwendung des Elektromotors in Kombination mit dem Verbrennungsmotor in Hybridkonzepten oder die ausschließliche Verwendung eines Elektromotors als Traktionsmotor in vollelektrischen Antriebskonzepten. Für die Energieversorgung des Elektromotors und damit als Energiespeicher an Bord der Automobile für einen CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Betrieb weisen elektrochemische Energiespeicher vielversprechende Eigenschaften auf. Der derzeit erfolversprechendste elektrochemische Energiespeicher für den Anwendungsfall im Automobil ist die Lithium-Ionen-Batterietechnologie. Für eine Konkurrenzfähigkeit und eine gleichwertige Kundenakzeptanz des elektrischen Antriebsstranges gegenüber einem konventionellen Antriebsstrang gilt es jedoch unter anderem, die Hemmnisse der geringen Reichweite von Elektrofahrzeugen und des hohen Anschaffungspreises zu optimieren. Diese beiden aufgeführten Nachteile sind hauptursächlich auf die Batterietechnologie zurückzuführen. Aus diesem Grund liegt ein Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung auf der Erforschung von neuen Hochenergie- und Hochleistungs-Materialkombinationen für neue Zellchemien mit hohen Energie- und Leistungsdichten. Parallel dazu ist erforderlich, die notwendige Produktionstechnologie für die Zellherstellung weiterzuentwickeln, sodass zum einen die Zellen funktionstüchtig in hoher Qualität hergestellt werden können und dass zum anderen eine wirtschaftliche Produktion realisierbar wird.

Zusätzlich zum Anwendungsgebiet in der Automobilindustrie rücken elektrochemische Energiespeicher im Zuge der Energiewende in den Vordergrund, sei es als Heimspeicher zur Pufferung des Solarstromes oder als industrieller Speicher des regenerativ erzeugten Stroms.

Beide Anwendungsfälle eint der Bedarf an wirtschaftlichen Batteriezellen mit hoher Energie- und Leistungsdichte. Prädestiniert hierfür ist die Verwendung von großformatigen Zellen, sodass eine Ausrichtung der Produktionstechnologieentwicklungen hierauf lohnenswert erscheint.

## 1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll daher ein Verfahrensablauf für die Stapelbildung von großformatigen Zellen erarbeitet werden. Dazu werden zunächst der Stand der Technik für die Herstellung von Batteriezellen vorgestellt und bestehende Defizite sowie Fragestellungen abgeleitet (Kapitel 2). Darauf aufbauend werden die Zielsetzung und die Vorgehensweise definiert (Kapitel 3). Für die Verwendung von kontinuierlichen Materialbahnen werden in Kapitel 4 zunächst die Zielkriterien für ein Stapeldesign mit großformatigen Abmessungen und kontinuierlichen Materialbahnen konkretisiert und ein entsprechendes Stapeldesign konzipiert (Kapitel 4). Zur Realisierung dieses Stapeldesigns werden daraufhin im folgenden Kapitel die Zielkriterien für einen Stapelbildungsprozess aufgestellt, ein Stapelbildungsablauf definiert und dessen Zusammenhänge der Parameter beleuchtet (Kapitel 5). Im Fokus steht hierbei die Materialbahnformung um  $180^\circ$  mit direkter Ablage der Materialbahn auf den Stapel. Hierfür werden zunächst die notwendigen Prozessschritte abgeleitet und deren Materialbahnverläufe parametrisiert (Kapitel 6). Diese Materialbahnverläufe werden auf ein vorliegendes Zeldesign angewandt und optimiert. Für die Realisierung der definierten Materialbahnverläufe werden die notwendigen Hardwarekomponenten zur Materialbahnzuführung und Formung abgeleitet und konstruiert, diese werden anschließend prototypisch umgesetzt (Kapitel 7). Die erzielten Ergebnisse werden anhand der zu Beginn der Arbeit aufgestellten Fragestellungen diskutiert (Kapitel 8). Abschließend erfolgen eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf weitere mögliche Arbeiten (Kapitel 9).

## 2 Stand der Forschung und Technik

Im Stand der Forschung und Technik werden die relevanten Themengebiete für die spätere Erarbeitung eines neuen Verfahrensablaufs zur Zellstapelbildung vorgestellt. Hierbei werden zunächst das Funktionsprinzip und die verschiedenen Bauformen von Li-Ionen Batteriezellen vorgestellt. Des Weiteren wird der Produktionsprozess von Li-Ionen Batteriezellen erläutert. Der Prozessschritt der Stapelbildung wird anschließend vertieft diskutiert. Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung.

### 2.1 Funktionsprinzip und Bauformen von Li-Ionen Batteriezellen

#### 2.1.1 Funktionsprinzip von Li-Ionen Batteriezellen

Li-Ionen Batteriezellen sind elektrochemische Energiespeicher, dies bedeutet, dass eine chemische Reaktion zur Erzeugung eines elektrischen Stroms genutzt wird (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 3). Der Aufbau und die prinzipielle Funktionsweise einer Li-Ionen Batteriezelle sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

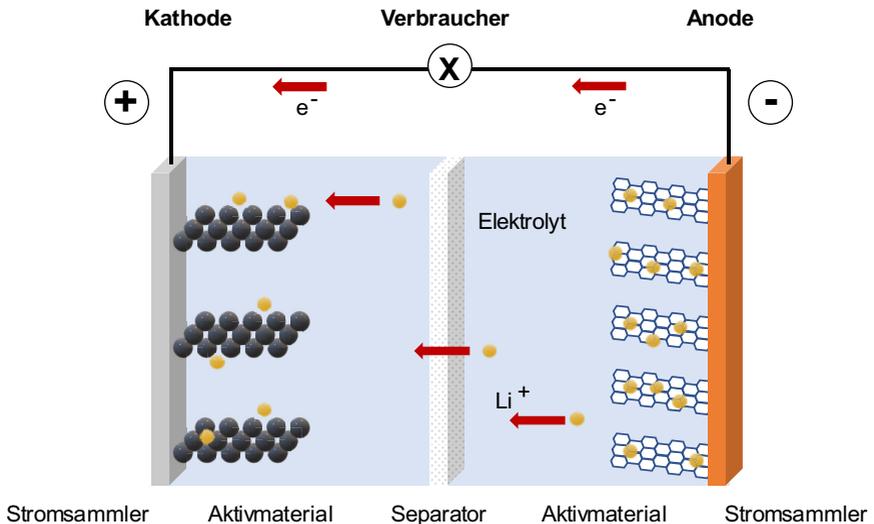


Abbildung 2-1 Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen Batteriezelle (Korthauer 2013, S. 15)

Li-Ionen Batteriezellen beruhen im Kern auf einer oder mehreren galvanischen Zellen. Hierbei sind die beiden Elektroden räumlich voneinander getrennt angeordnet. Zwischen den Elektroden befindet sich ein ionenleitfähiger Elektrolyt und eine poröse Membran, der Separator, welche die beiden Elektroden voneinander isoliert (Korthauer 2013, S. 14). Die Elektroden bestehen aus einem Aktivmaterial, ein chemisch umsetzbares Material, und einem Stromsammler, ein elektrischer Kontakt (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 3). Während der Lade- und Entladevorgänge werden bei Li-Ionen Batteriezellen Li-Ionen in die Gitterstruktur der Aktivmaterialien der Elektroden ein- und ausgelagert, diese Vorgänge werden als Interkalation bzw. Deinterkalation bezeichnet (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 4). Beim Entladen werden, wie in Abbildung 2-1 dargestellt, die Ionen von der negativ geladenen Elektrode, Anode, durch eine Potenzialdifferenz durch den Elektrolyten und den Separator zur positiv geladenen Elektrode, Kathode, bewegt und interkaliert (Korthauer 2013, S. 14). Gleichzeitig wandern Elektronen über die Stromsammler und eine äußere elektrisch leitende Verbindung von der Anode zur Kathode (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 3). Beim Ladevorgang werden diese Prozesse umgekehrt, aufgrund dieser Wiederaufladefähigkeit zählen Lithium-Ionen Batteriezellen zur Klasse der Sekundärbatterien. Nicht wiederaufladbare Batterien werden im Gegensatz dazu als Primärbatterien bezeichnet (Kampker 2014, S. 43).

Bei der Anode wird derzeit üblicherweise eine dünne Kupferfolie als Stromsammler eingesetzt, die Foliendicke beträgt aktuell in Abhängigkeit des Batteriezelltyps ca. 10  $\mu\text{m}$  (Kurzweil & Dietlmeier 2015, S. 217). In Tabelle 2-1 ist eine Auswahl aktueller Aktivmaterialien der Anode ersichtlich (Takamura & Brodd 2006).

*Tabelle 2-1 Anoden-Aktivmaterial*

| Bezeichnung           | Strukturformel                        |
|-----------------------|---------------------------------------|
| Graphite              | $\text{LiC}_6$                        |
| Silizium              | $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$           |
| Lithiumtitanate (LTO) | $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ |

Als Stromsammler der Kathode kommt derzeit im Allgemeinen eine dünne Aluminiumfolie zum Einsatz. Die Foliendicke beträgt in Abhängigkeit des Batteriezelltyps ca. 20  $\mu\text{m}$  (Kurzweil & Dietlmeier 2015, S. 217). Eine Auswahl von Aktivmaterialien der Kathode ist in Tabelle 2-2 dargestellt (Korthauer 2013, S. 25).

Tabelle 2-2 Kathoden-Aktivmaterial

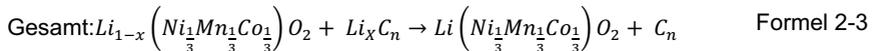
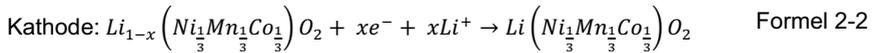
| Bezeichnung                             | Strukturformel  |
|---|---|
| Lithium-Kobaltoxid LCO                  | $LiCoO_2$   |
| Lithium-Manganoxid LMO                  | $LiMn_2O_4$   |
| Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid NMC    | $LiNi_{\frac{1}{3}}Mn_{\frac{1}{3}}Co_{\frac{1}{3}}O_2$ |
| Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid NCA | $LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_2$                       |
| Lithium-Eisenphosphat LFP               | $LiFePO_4$  |

Die auf die Stromsammler aufgetragenen Materialmassen bestehen neben den aufgeführten Aktivmaterialien zusätzlich aus Binder, welcher die Haftfähigkeit der Aktivmaterialien an den Stromsammler verbessert sowie die Kohäsion zwischen den Elektrodenpartikeln sicherstellt. Des Weiteren werden Leitpartikel eingesetzt, welche zur Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit dienen (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 20; Korthauer 2013, S. 111).

Der Separator dient zur Vermeidung eines direkten Kontaktes und damit eines Kurzschlusses der beiden Elektroden. Aufgrund der erforderlichen Durchlässigkeit der Ionen durch den Separator muss dieser eine entsprechende Porosität aufweisen (Korthauer 2013, S. 24). Neben der Isolation und der Porosität muss das Separatormaterial unter anderem Anforderungen hinsichtlich homogener Permeabilität, spezifischer Dicke, mechanischer Stabilität, thermischer und chemischer Stabilität, Benetzungsfähigkeit mit Elektrolyt, Sicherheit und Kosten erfüllen (Zhang 2007). Die Separatormaterialdicke entspricht je nach Zelltyp und verwendetem Separatormaterial in etwa der Größenordnung der Stromsammlerfoliendicken. Derzeitig eingesetzte Separatormaterialien sind mikroporöse Polymermembrane (Polyolefine), Vliese und anorganische Komposite, letztere werden auch als keramische Separatoren bezeichnet (Kurzweil & Dietlmeier 2015, S. 215).

Die Hauptfunktion des Elektrolyts ist es, den ionischen Ladungstransport zwischen den Elektroden zu gewährleisten (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 12). Weitere Anforderungen an den Elektrolyten sind neben der ionischen Leitfähigkeit die thermische sowie die elektrochemische Stabilität. Derzeit finden überwiegend flüssige Elektrolyte in Lilonen Batterien Verwendung. Diese bestehen aus Leitsalzen (bspw. Lithiumhexafluorophosphat (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 703) und hochreinen organischen Lösungsmitteln (bspw. Ethylencarbonat (Kurzweil & Dietlmeier 2015, S. 201)) (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 12; Korthauer 2013, S. 61).

Für ein Lithium-NMC-System ergeben sich für einen Entladevorgang nachfolgende Reaktionsgleichungen (Linden & Reddy 2011, S. 1077):



Damit an der Anode keine unerwünschte Nebenreaktion von dem Elektrolyten mit dem Aktivmaterial der Anode abläuft, ist es wichtig, dass beim Zellherstellungsprozess eine passivierende Deckschicht auf dem Aktivmaterial der Anode ausgebildet wird. Diese sogenannte SEI, Solid Electrolyte Interface, schützt das Aktivmaterial vor direktem Kontakt mit dem Elektrolyten (Korthauer 2013, S. 17) und verhindert somit dessen Zersetzung und eine Korrosion der Anode (Borchard-Tuch 2003, S. 436). Die Deckschicht wird durch Produkte der Elektrolytzersetzung ausgebildet (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 15).

Ein fortwährendes Wachstum der SEI nach Initialisierung der Schicht ist ein unerwünschter Prozess, welcher die Leistung und die Kapazität der Batteriezelle vermindert (Kurzweil & Dietmeier 2015, S. 230). Die Zellalterung wird bei Graphitanoden im Wesentlichen von der Stabilität der SEI beeinflusst (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 14).

Neben dem unerwünschten Wachstum der SEI der Anode existieren weitere Alterungsmechanismen, eine Auswahl dieser wird nachfolgend aufgezeigt.

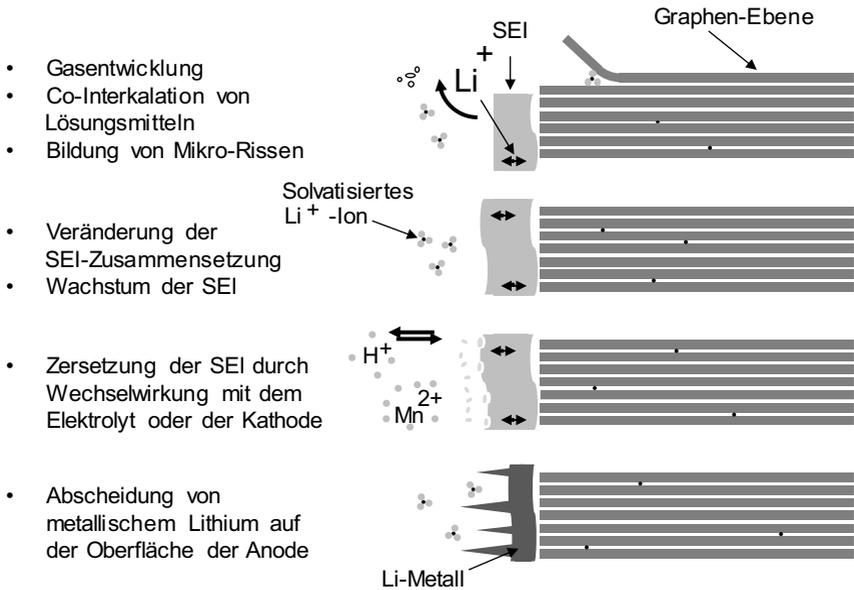


Abbildung 2-2: Ausgewählte Versagensmechanismen der Anode (in Anlehnung an (Vetter & Novak et al. 2005, S. 269))

In Abbildung 2-2 sind ausgewählte Versagensmechanismen der Anode dargestellt. Neben der möglichen Zersetzung des Elektrolyts aufgrund erhöhter Temperaturen sind dies Zersetzungs Vorgänge der SEI aufgrund von Wechselwirkungen mit dem Elektrolyten sowie das bereits erläuterte SEI Wachstum (Kurzweil & Dietlmeier 2015, S. 230). Die Abscheidung von reinem, metallischem Lithium auf der Anodenoberfläche wird als Lithium-Plating bezeichnet (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 15). Diese Lithium-Anlagerungen sind überwiegend irreversibel (Vetter & Novak et al. 2005, S. 272). Bilden sich diese Abscheidungen als lange metallische Nadeln aus, werden diese als Dendriten bezeichnet (Korthauer 2013, S. 24). Dendriten können zu einer Beschädigung des Separators und somit zu einem internen Kurzschluss der Zelle führen. Die damit verbundenen hohen Entladeraten können eine starke Erhitzung der Zelle mit sich führen, was wiederum einen Zellbrand auslösen kann (Bhattacharyya & Key et al. 2010, S. 504). Eine Ursache für das Lithium-Plating liegt unter anderem in einer fehlerhaften geometrischen Anordnung einer Kathode zu einer Anode, bei der die Kathode die

Anode überragt (Vetter & Novak et al. 2005, S. 272). Für weitere Ursachen sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (Vetter & Novak et al. 2005).

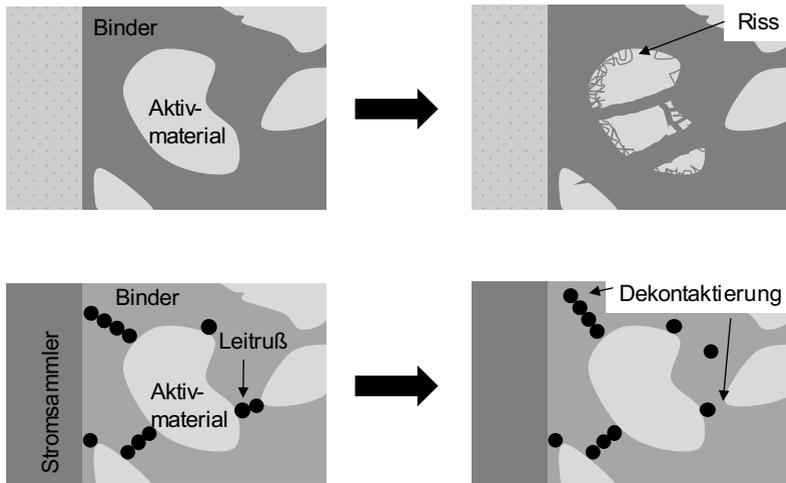


Abbildung 2-3 Alterungsvorgänge auf der Kathode nach (Leuthner 2013, S. 18)

Alterungsmechanismen auf Seiten der Kathode sind neben chemischen Zersetzungsreaktionen im Elektrolyten und Modifikationen von Oberflächenfilmen strukturelle Vorgänge (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 14). Die Ein- und Auslagerungsvorgänge der Ionen sind mit einer Volumenänderung der Aktivmaterialien verbunden (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 15). Diese sogenannte Zellatmung findet in der Größenordnung von ca. 10 % des Volumens des Elektrodenmaterials statt (Vetter & Novak et al. 2005, S. 272; Korthauer 2013, S. 59). Hierdurch werden mechanische Spannungen hervorgerufen, welche zu einer Rissbildung des Aktivmaterials führen können, wie in Abbildung 2-3 oben dargestellt. Des Weiteren können die mechanischen Spannungen ein Auftrennen der elektrischen Leitpfade hervorrufen, hierbei kommt es zu einer Dekontaktierung der Leitrußpartikel, sodass Bereiche entstehen, welche nicht mehr elektrisch mit dem Stromsammel verbunden sind. Dies ist in Abbildung 2-3 unten dargestellt. Diese Alterungsvorgänge können prinzipiell bei der Kathode und Anode auftreten (Korthauer 2013, S. 19).

### 2.1.2 Bauformen von Li-Ionen Batteriezellen

Eine Batteriezelle besteht aus mehreren Anoden- und Kathodenlagen und somit aus mehreren galvanischen Zellen, deren Funktionsweise in Kapitel 2.1.1 erläutert wurde. In Anwendungsfällen wie beispielsweise als Traktionsbatterie im Automobil oder als Speichermedium in stationären Stromspeichern werden mehrere Batteriezellen zu einem Batteriesystem verschaltet.

#### Batteriesystem

Das Verschalten der Batteriezellen zu einem Batteriesystem kann, wie in Abbildung 2-4 schematisch dargestellt, dadurch erfolgen, dass Batteriezellen zunächst zu einem Batteriemodul zusammengefasst und anschließend die Batteriemodule zu einem Batteriesystem verschaltet werden (Kampker 2014, S. 57).

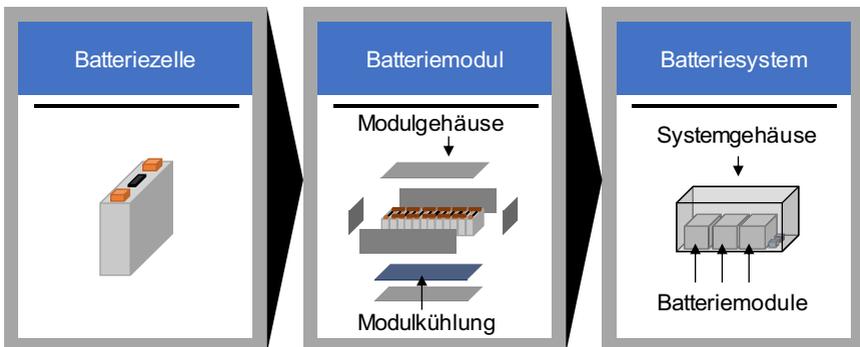


Abbildung 2-4 Schematisches Batteriesystem  
(Tornow & Graubohm et al. 2016, S. 425)

Bei der Batteriemodulbildung werden die Batteriezellen gemäß der vorgesehenen Verschaltungsstrategie miteinander kontaktiert (Schmitt 2015, S. 31). Zudem werden bei der Modulbildung die Batteriemanagementsystemkomponenten montiert und die notwendigen Kühlkomponenten angebracht (Ketterer B. & Karl et al. 2009, S. 22). Die Batteriezellen werden von einem Batteriemodulgehäuse umschlossen. In Abhängigkeit der gewünschten Batteriesystemgröße werden die benötigte Anzahl an Batteriemodulen zur Systembildung angeordnet und verschaltet sowie weitere benötigte Elektronikkomponenten und Kühlkomponenten montiert (Kampker 2014, S. 59).

Bei großformatigen Batteriezellen, welche als Traktionsbatterie im Automobil oder als Speichermedium in stationären Stromspeichern Einsatz finden, kann zwischen drei

gängigen Aufbauarten unterschieden werden. Diese typischen Aufbauarten Rundzelle, prismatische Hard-Case-Zelle und Pouch-Zelle sind in Abbildung 2-5 dargestellt.

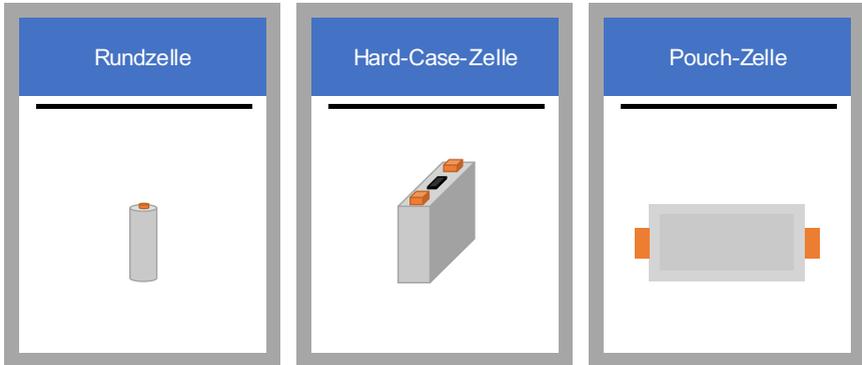


Abbildung 2-5 Typische Aufbauarten Rundzelle, prismatische Hard-Case-Zelle und Pouch-Zelle nach (Schmitt 2015, S. 32)

Die elektrochemische Funktionsweise ist bei allen drei Aufbauarten identisch. Ebenso basieren alle Zellgehäuse der unterschiedlichen Aufbauarten auf metallischen Gehäusen (Korthauer 2013, S. 111). Dies ist dadurch begründet, dass für die Realisierung der Funktion der Dichtheit des Gehäuses die Eigenschaften metallischer Werkstoffe benötigt werden. Hierbei ist der Eintritt von Feuchtigkeit in die Zelle zu verhindern, da dies zur Hydrolyse des Leitsalzes  $LiPF_6$  zu Fluorwasserstoff und somit zur Zerstörung der Zelle führen würde. Zudem wird durch das Gehäuse der Austritt von Lösemitteln aus der Zelle verhindert (Korthauer 2013, S. 112). Im Zellinneren befinden sich die Komponenten, welche für eine Realisierung der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Funktionsweise erforderlich sind. Die Ausprägung dieser Komponenten sowie die Zelleigenschaften variieren zwischen den Zellbauformen, daher werden im Folgenden die unterschiedlichen Charakteristika der drei Zellbauformen erläutert.

### Rundzelle

Die Rundzelle ist in der Consumer Industrie weit verbreitet, hierbei werden oftmals die genormten geometrischen AA / AAA-Zellabmessungen verwendet. Als Traktionsbatterie kommt die Rundzelle beispielsweise bei Tesla im 18650-Format zum Einsatz. Dieses zylindrische Zellformat ist eine Rundzelle mit einem Durchmesser von 18 mm und einer Länge von 65 mm (Korthauer 2013, S. 113). Zudem finden auch 21700-Rundzellen, gemäß Bezeichnung mit einem Durchmesser von 21 mm und 70 mm Länge, bei

Tesla Verwendung. Ein großer Vorteil von Rundzellen ist, dass diese ein mechanisch robustes Gehäuse aufweisen, woraus eine hohe innere Druckstabilität resultiert (Kampker 2014, S. 55). Nachteilig ist, dass geometriebedingt bei einer Aneinanderreihung der Zellen auf Batteriemodulebene eine ineffiziente Bauraumausnutzung erfolgt (Kampker 2014, S. 55). Des Weiteren weisen Rundzellen ein ungünstiges Oberflächen-Volumen-Verhältnis auf, sodass die Temperierung der Zellen erschwert ist (Rahimzei & Sann et al. 2015, S. 18). Im Inneren der Rundzelle sind die kontinuierlich durchgehend ausgeführten Materialbahnen der Anode, der Kathode und des Separators zu einem zylindrischen Wickel aufgerollt (Schmitt 2015, S. 31).

### **Prismatische Hard-Case-Zelle**

Prismatische Hard-Case-Zellen weisen ein quaderförmiges stabiles Gehäuse auf (Kampker 2014, S. 56). Durch den rechteckigen Querschnitt und die damit verbundenen Anordnungsmöglichkeiten der Zellen in einem Batteriemodul kann eine im Vergleich zu Rundzellen effizientere Bauraumausnutzung auf Batteriemodulebene realisiert werden. Ein Nachteil dieses Zelltyps ist der aufwändige, aus mehreren Einzelteilen bestehende Gehäuseaufbau (Rahimzei & Sann et al. 2015, S. 20). Im Inneren der prismatischen Zellen können verschiedene Elektroden-Separator-Stapel-Varianten mit rechteckiger Grundfläche eingesetzt werden. Beispielsweise können Verbünde aus gestapelten Einzelblättern von Anode, Kathode und Separator bestehen. Ebenso können kontinuierliche Flachwickel mit rechteckiger Grundfläche verwendet werden, bei welchen kontinuierliche Materialbahnen der Elektroden und des Separators gewickelt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Z-gefalteten Stapels, bei welchem die Elektroden aus Einzelblättern bestehen und der Separator kontinuierlich ausgeführt ist (Reinhart & Kurfer 2011).

### **PouchZelle**

Bei der Zellbauform der Pouchzelle wird im Gegensatz zur Rundzelle und zur prismatischen Hard-Case-Zelle eine flexible Verbundfolie aus Aluminium und Kunststoff als Gehäusematerial verwendet (Korthauer 2013, S. 112). Hieraus ergeben sich Vorteile im Hinblick auf das Zellgewicht dieser Bauform im Vergleich zu den beiden anderen Bauformen (Kampker 2014, S. 54). Aufgrund ihrer rechteckigen Grundfläche und ihrer somit prismatischen Geometrie ergeben sich für die Pouchzelle, ähnlich der prismatischen Hard-Case-Zelle, Vorteile hinsichtlich Kühlung und Bauraumausnutzung auf Batteriemodulebene (Kampker 2014, S. 55). Im Inneren der Zelle können die Elektroden-

Separator-Stapel-Varianten analog der prismatischen Hard-Case Zelle eingesetzt werden.

Im Vergleich der drei Zellbauformen ist die hohe innere Druckstabilität der Rundzelle und die langjährige Erfahrung bei dieser Bauform in Produktdesign und Produktion vorteilhaft. Die prismatische Hard-Case Zelle weist im Vergleich Vorteile bei der Batteriemodulbildung auf. Bedingt durch ihren Aufbau hat die Pouchzelle hinsichtlich der Energiedichte Vorteile.

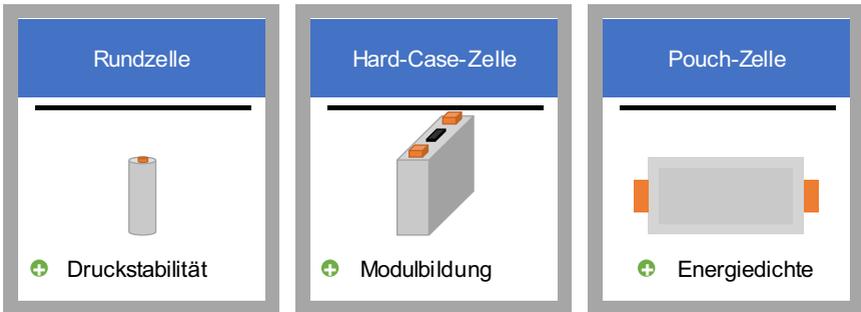


Abbildung 2-6 Hauptvorteile der Zellbauformen in Anlehnung an (Kampker 2014, S. 55)

Aufgrund der Gewichts- und der Montagevorteile, insbesondere auf Batteriemodulebene, weisen die Zellbauformen der Pouch-Zelle und der prismatischen Hard-Case-Zelle für großformatige Zellen große Potenziale auf (Baumeister 2017, S. 10; Kurfer & Westermeier et al. 2012b, S. 1). Daher stehen Zellen mit einer großformatigen rechteckigen Grundfläche für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit im Fokus. Aus diesem Grund wird nachfolgend der Produktionsprozess einer Batteriezelle an der Herstellung einer Pouchzelle erläutert.

## 2.2 Produktionsprozess von Li-Ionen Batteriezellen

Nach (Kampker 2014, S. 61) kann der Produktionsprozess für Li-Ionen Batteriezellen in die drei Hauptprozesse Elektrodenfertigung, Zusammenbau der Zelle und Aktivieren der Zelle eingeteilt werden. Die Hauptprozesse bestehen aus mehreren Teilprozessschritten, welche im Folgenden näher erläutert werden. Der Produktionsprozess wird anhand der Pouch-Zelle dargestellt.

### 2.2.1 Elektrodenfertigung

Die Elektrodenfertigung kann in fünf Schritte unterteilt werden, siehe Abbildung 2-7.

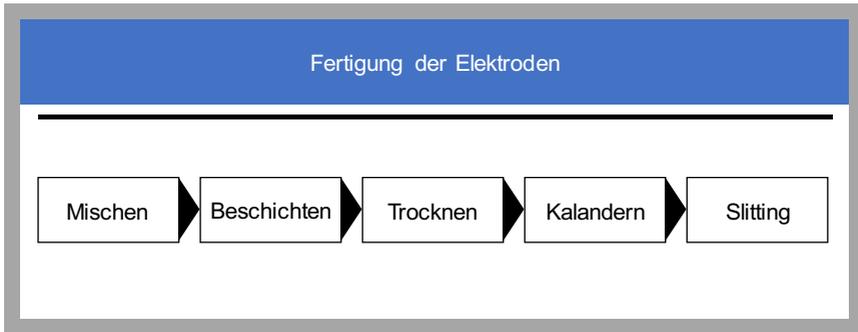


Abbildung 2-7 Prozesskette zur Elektrodenherstellung (nach (Kampker 2014, S. 61))

Im ersten Prozessschritt, dem **Mischen**, wird in Trocken- und Nassmischprozessen eine Elektrodendispersion hergestellt. Diese viskose Paste, auch Slurry genannt, besteht aus Aktivmaterial, Bindermaterial, Leitruß und Lösungsmittel (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 697–699; Vuorilehto 2013, S. 23). Aktivmaterial, Bindermaterial und Leitruß liegen zu Beginn in pulverförmigem Zustand vor, Lösungsmittel in flüssigem Zustand. Zunächst werden die Materialien genau abgewogen und dann dem Mischvorgang zugeführt. Dieser unterteilt sich in mehrere Trocken- und Nassmischvorgänge (Kampker 2014, S. 61). Ziel ist es, eine homogene Vermischung der Komponenten zu erzielen, da Inhomogenitäten in der Elektrode zu einer schnelleren Alterung derselben führen können (Kehrwald & Shearing et al. 2011, S. 1393–1399). Die homogene Vermengung der Partikel wird durch den Energieeintrag von Scherkräften durch das Mischwerkzeug erzielt (Bitsch & Willenbacher et al. 2015, S. 467). Der homogen vermengte Slurry ist unmittelbar nach Herstellung weiterzuverarbeiten, da bereits nach wenigen Stunden Entmischungseffekte auftreten können (Kaiser & Wenzel et al. 2014; Kampker 2014, S. 62).

Nach dem Mischen erfolgt das **Beschichten**. Hierbei wird der Slurry auf die jeweilige Trägerfolie der Elektrode aufgetragen. Das Beschichten erfolgt in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess, sodass die Trägerfolienmaterialbahnen kontinuierlich vorliegen. Die Beschichtung kann entweder parallel auf beiden Seiten erfolgen oder es erfolgt eine nachgela-

gerte Beschichtung der zweiten Seite. Des Weiteren ist zwischen einem kontinuierlichen und einem intermittierenden Substratauftrag zu unterscheiden (Kaiser & Wenzel et al. 2014). Eine intermittierende Beschichtung weist gezielt nicht beschichtete Abschnitte auf, sodass in diesen Bereichen kein Substratauftrag auf die Trägerfolie erfolgt. Eine Auswahl an Beschichtungsmustern ist in Abbildung 2-8 dargestellt. Gängige Auftragsverfahren sind Schlitzdüsensysteme und Rakelverfahren. Ziel ist es, eine hohe Querverteilungsgenauigkeit der Beschichtungsmassen und damit eine konstante Schichtdicke zu erzeugen. Zudem ist eine gute Adhäsion des Slurrys an die Trägerfolie von Bedeutung (Kampker 2014, S. 62).

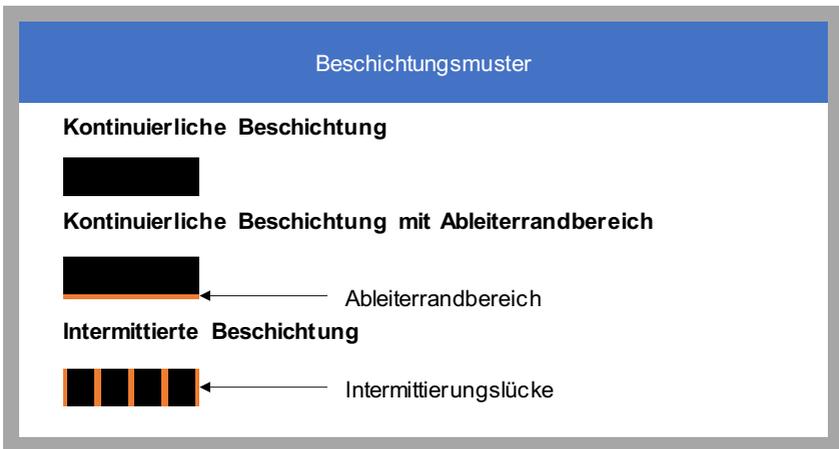


Abbildung 2-8 Verschiedene Beschichtungsmuster

Unmittelbar nach dem Beschichtungsvorgang erfolgt das **Trocknen** der Elektrodenbahnen. Hierfür werden die Materialbahnen kontinuierlich durch einen Trockner geführt. Die Bahnführung kann berührungsfrei basierend auf Luftstrahlen oder berührend, durch Rollen, realisiert werden. Der Trocknungsvorgang erfolgt durch Warmluft und/oder Infrarotstrahlung. Zur Vermeidung von unerwünschten Reaktionen erfolgt der Trockenvorgang unter Schutzgas oder im Vakuum. Beim Trocknen verdampft das Lösungsmittel, sodass sich die Aktivmaterialien verfestigen. Aufgrund der verbreiteten Verwendung des gesundheitsgefährdenden NMP, N-Methyl-2-pyrrolidon, als Lösungsmittel muss dieses freigesetzte Lösungsmittel entweder in der Nachverbrennung verbrannt werden oder es muss eine entsprechende Rückgewinnung durchgeführt werden (Kampker

2014, S. 65). Wasserbasierte Lösungsmittel können alternativ bei der Anodenherstellung verwendet werden (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 698), bei der Kathodenherstellung befinden diese sich jedoch noch im Forschungsstadium (Pettinger 2013a, S. 223).

Nach der Trocknung der Elektrodenmaterialbahnen erfolgt das **Kalandrieren**. Hierbei werden die Materialbahnen durch den Druck von zwei übereinander befindlichen Kalandrierwalzen verdichtet (Kampker 2014, S. 67). Durch diesen mechanischen Druck soll die Anbindung der Aktivmaterialpartikel zueinander verbessert sowie die Grenzfläche von Materialbeschichtung zu Trägerfolie optimiert werden, wodurch die elektrische Leitfähigkeit der Elektroden verbessert wird (Haselrieder & Ivanov et al. 2013). Beim Kalandrieren werden die Materialbahnen auf ein definiertes Maß gewalzt, wodurch die Porosität von ca. 50 % auf ca. 30 % verringert wird (Zheng & Tan et al. 2012, S. 52).

Die Fertigungsschritte Beschichten, Trocknen und Kalandrieren werden üblicherweise in Rolle-zu-Rolle-Prozessen realisiert. In Abhängigkeit der realisierten Materialbahnbreite dieser Prozesse und der für den Zusammenbau der Zelle benötigten Materialabmessungen erfolgt nach dem Kalandrieren noch ein **Slitting** der Materialbahnen. Das Zuschneiden der Materialbahnen erfolgt zunächst längs der Beschichtungsrichtung und kann entweder mittels mechanischem Schneidsystem, wie Rollenmesser, Bandstahlschnitt oder mittels Laser erfolgen. Je nach gewünschter Elektrodenabmessung kann zudem noch eine Konfektionierung quer zur Beschichtungsrichtung erfolgen (Kampker 2014, S. 68). Nach dem Slitting werden die Elektrodenmaterialien nochmals gereinigt und zum Zusammenbau der Zelle bereitgestellt.

### 2.2.2 Zusammenbau der Zelle

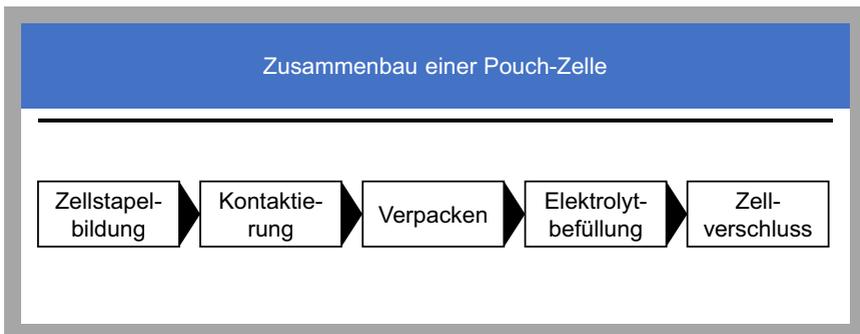


Abbildung 2-9 Prozessschritte beim Zusammenbau einer Pouch-Zelle in Anlehnung an (Kampker 2014, S. 68)

Für den Zusammenbau der Zelle ist eine Trockenraumatmosfera erforderlich. Eine Absorption von Wasser würde das Interkalationsverhalten der Aktivmaterialien negativ beeinflussen. Zudem kann in Abhängigkeit des verwendeten Elektrolyts und der Temperatur die Bildung von Flusssäure hervorgerufen werden (Herb 2010). Zur Vermeidung der Aufnahme von Feuchtigkeit erfolgt daher üblicherweise der Zusammenbau der Zelle in einem Trockenraum mit einem Taupunkt zwischen  $-40\text{ °C}$  und  $-60\text{ °C}$  (Schmitt 2015, S. 36). Alternativ zu Trockenräumen können gekapselte Gloveboxsysteme verwendet werden. Für die industrielle Herstellung von großformatigen Zellen werden Trockenräume bevorzugt. Aufgrund der Anforderungen an den Feuchtigkeitsgehalt der Elektrodenmaterialien werden diese teilweise unmittelbar vor Bereitstellung für den Zusammenbau nochmals nachgetrocknet (Bockwinkel & Dröder et al. 2016, S. 252).

Der Zusammenbau der Zelle kann in fünf Prozessschritte unterteilt werden, siehe Abbildung 2-9. Bei der **Zellstapelbildung** werden die Anoden-, Separator- und Kathodenmaterialien zu Elektroden-Separator-Stapel verarbeitet. Hierbei ist zu beachten, dass zwischen Anoden- und Kathodenflächen immer eine Separatorlage eine vollständige räumliche Trennung realisiert. Des Weiteren muss sich gegenüber einer Kathodenfläche immer eine Anodenfläche befinden, da Kathodenflächen ohne korrespondierende Anodenflächen Lithium-Plating hervorrufen können (Pettinger 2013a, S. 221). Zudem sind die Anodenflächen so zu realisieren, dass diese die Kathodenflächen vollständig überdecken und in den Randbereichen größer ausgeführt werden als die Kathodenflächen, damit die Interkalation im Randbereich nicht beeinträchtigt und die Entstehung von Lithium-Plating vermieden wird (Pettinger 2013b, S. 263). Daher ist eine Positioniergenauigkeit der Lagen von ca.  $\pm 0,1\text{ mm}$  zu realisieren (Heimes & Kampker et al. 2018, S. 11). Die Elektrodenbahnmaterialbahnen, die üblicherweise eine Dicke von ca. 100 bis 200  $\mu\text{m}$  haben, weisen biegeschlaffe Eigenschaften auf. Zudem gilt es eine beschädigungsfreie Verarbeitung sicherzustellen, sodass keine Partikelaustritte entstehen und dadurch die Performance sowie die Sicherheit der Zelle beeinträchtigt werden. Dies ist ebenso bei der Verarbeitung des Separators, der eine Materialdicke kleiner 20  $\mu\text{m}$  aufweist, zu gewährleisten. Hieraus resultieren entsprechende Herausforderungen für die Handhabung und Verarbeitung der Elektroden- und Separatormaterialien. In Abhängigkeit der gewünschten Bauform des Stapels kann die Herstellung mit Stapel-, Falt- oder Wickelprozessen erfolgen (Schmitt 2015, S. 35; Kurfer & Westemeier et al. 2012a). Hierbei können sowohl Materialeinzelblätter als auch kontinuierliche Materialbahnen oder Mischformen verarbeitet werden. Aufgrund der leistungs- und

qualitätsbestimmenden Relevanz wird die Zellstapelbildung in Kapitel 2.3 vertieft diskutiert.

Bei der **Kontaktierung** werden die Ableiterfahnen der Anodenlagen und der Kathodenlagen mit dem jeweiligen Ableiterblech verschweißt. Die Ableiterbleche führen in der fertigen Zelle den Strom aus der verschlossenen Zelle. Das Kontaktieren erfolgt überwiegend mittels Ultraschallschweißen (Kim & Yum et al. 2011, S. 17) oder Laserschweißen (Kirchhoff 2013, S. 2; Ebert & Roscher et al. 2014, S. 63). Die Kontaktstellen müssen einen geringen Übergangswiderstand besitzen, dieser muss zwischen Anoden- und Kathodenableiterblech einheitlich sein (Schmitt 2015, S. 35).

Im Anschluss an die Kontaktierung erfolgt das **Verpacken** des kontaktierten Zellstapels. Das Gehäuse der Pouchzelle besteht üblicherweise aus einer mehrlagigen Aluminium-Verbundfolie. Dieser Verbund kann beispielsweise aus Polyamid (25 µm), Walz aluminium (40 µm) und Polypropylen (50 µm) aufgebaut sein (Korthauer 2013, S. 112) und als Flachbeutel oder als Tiefziehfolie ausgeführt sein (Kampker 2014, S. 70). Oftmals werden zwei identische Halbschalen verwendet, welche durch Tiefziehen hergestellt wurden (Fleischer & Singer et al. 2015, S. 730). Beim Verpacken wird der kontaktierte Zellstapel in eine Halbschale positioniert und die zweite Halbschale aufgelegt. Anschließend erfolgt die Versiegelung der Zelle an drei Seiten (Kampker 2014, S. 72).

Die vierte Seite bleibt zunächst offen, damit über diese Öffnung die **Elektrolytbefüllung** erfolgen kann. Zur Unterstützung der Elektrolytbenetzung der Materialien wird die Elektrolytbefüllung in einer Vakuumkammer durchgeführt. Von Bedeutung für die Leistungsfähigkeit einer Zelle ist die vollständige Benetzung der Materialschichten mit Elektrolyt, sodass beim Befüllen das Einbringen einer definierten Menge Elektrolyt und deren Verteilung im Zelleinneren zu erfolgen hat. Andernfalls können Leistungsverluste der Zelle oder Dendritenwachstum hervorgerufen werden (Knoche & Surek et al. 2016, S. 405).

Das Verschließen der vierten Seite erfolgt ebenfalls in der Vakuumkammer, damit das Einschließen von Luftblasen in die Zelle vermieden wird. In Abhängigkeit vom Verhalten der Zellen beim nachfolgenden Formieren werden ggf. die Folienverpackungen größer ausgeführt, sodass sich eine Gastasche neben dem Zellstapel befindet (Kampker 2014, S. 72). In dieser Tasche wird das entstehende Gas aufgefangen, sofern die Zelle beim Formieren zur Gasbildung neigen sollte. Die Verbindung zwischen Zelle und Tasche

wird nach dem Formieren verschlossen, sodass die Gastasche abgetrennt werden kann. Dieser finale **Zellverschluss** erfolgt ebenfalls durch Siegeln. Beim Siegeln werden die Verpackungsfolien durch Heißsiegelbalken aufgeschmolzen und abgekühlt, wodurch sich eine stoffschlüssige Verbindung ausbildet (Baumeister 2017, S. 18). Die Bildung von Gas beim Formieren ist von der Zellchemie abhängig, sollte keine Gasbildung erfolgen, kann auf die Gastasche verzichtet werden und der finale Zellverschluss bereits unmittelbar nach der Elektrolytbefüllung durchgeführt werden (Kampker 2014, S. 72). Nach dem Verschließen der vierten Seite ist keine Trockenraumatmosfera mehr notwendig.

### 2.2.3 Aktivieren der Zelle

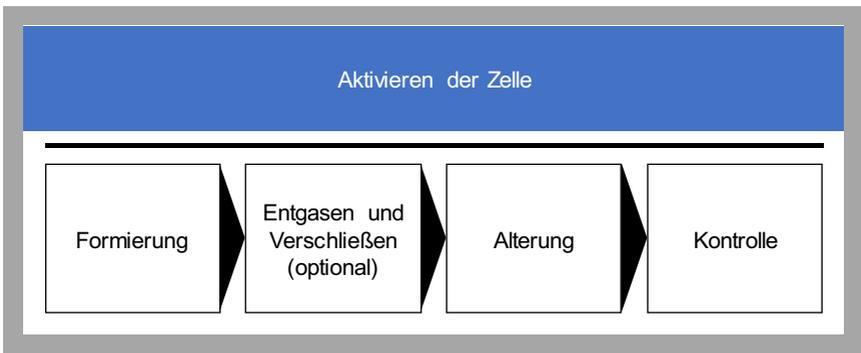


Abbildung 2-10 Prozessschritte zum Aktivieren der Zelle in Anlehnung an (Kampker 2014, S. 78)

Im Anschluss an den Zusammenbau der Zelle erfolgt das Aktivieren derselben. Die Aktivierung kann in vier Schritte eingeteilt werden, diese sind in Abbildung 2-10 dargestellt. Bei der **Formierung** der Zelle erfolgt das erstmalige Laden und Entladen, in mehreren Zyklen mit steigender Stromstärke. Während des Formierens wird die SEI-Schicht, Solid Electrolyte Interface, siehe Kapitel 2.1.1, ausgebildet (Tagawa & Brodd 2009). Die Formierung findet in speziellen Hochregallagern mit der notwendigen Sicherheitstechnik statt, in welchen jede Zelle einen einzelnen Platz erhält und über Kontaktstifte an das Formiergerät angeschlossen wird. Der Formiervorgang dauert etwa 24 Stunden, in denen die Zellen mit steigenden Stromstärken, C-Raten, be- und entladen werden. Die C-Rate, englisch current-rate, bezieht die Stromstärke auf die Kapazität der Zelle (Heimes & Kampker et al. 2018, S. 14).

In Abhängigkeit der Zellchemie und des daraus resultierenden Formierungsverhaltens der Zellen erfolgt nach der Formierung gegebenenfalls das **Entgasen und Verschließen** der Zelle. Hierbei wird die Gastasche aufgestochen und das entweichende Gas abgesaugt. Anschließend wird die Zelle final versiegelt und die Gastasche abgetrennt (Kampker 2014, S. 79). Sofern kein Entgasen notwendig sein sollte, wird die Zelle bereits beim Zusammenbau final versiegelt.

Bei der anschließenden **Alterung** wird die Zelle in temperierter Umgebung gelagert. Dieser Vorgang kann etwa 15 bis 30 Tage andauern (Kampker 2014, S. 80). Während der Lagerung wird die Zellspannung regelmäßig überprüft, da die letztendlichen Leistungsdaten erst nach einem gewissen Zeitraum festgestellt werden können. Die Alterung dient somit unter anderem der Qualitätssicherung.

Abschließend erfolgt eine **Kontrolle** der Zelle, beispielsweise hinsichtlich Zellspannung, Innenwiderstand und Kapazität. Anhand dieser Kriterien kann zudem eine Klassifizierung der Zellen erfolgen. Zur Rückverfolgbarkeit wird eine Barcodemarkierung auf die Zelle gedruckt.

## 2.2.4 Zusammenfassung Produktionsprozess von Li-Ionen Batteriezellen

Der Produktionsprozess einer Li-Ionen Pouch-Batteriezelle kann in drei Abschnitte unterteilt werden. Zunächst werden bei der Fertigung der Elektroden die Ausgangsmaterialien zu einem Slurry vermischt, welcher auf eine Trägerfolie beschichtet wird. Die Trägerfolie ist bei der Anode eine Kupferfolie, bei der Kathode eine Aluminiumfolie. Nach der anschließenden Trocknung erfolgt das Kalandrieren der Materialbahnen, das Komprimieren auf eine definierte Bahndicke und Porosität. Letzter Schritt der Elektrodenherstellung ist das Slitting, wobei die Materialbahn entlang ihrer Breite in mehrere schmalere Materialbahnen aufgeteilt wird.

Der Elektrodenfertigung schließt sich der Zusammenbau der Zelle an. Hierbei werden bei der Stapelbildung die biegeschlaffen Elektroden und der Separator abwechselnd zu einem Stapel angeordnet. In Abhängigkeit vom zu realisierenden Stapeldesign und Stapelbildungsverfahren werden entweder kontinuierliche Elektrodenbahnen verarbeitet oder es ist zunächst eine Konfektionierung der Elektrodenbahnen zu Elektrodenblättern durchzuführen. Der Stapelbildung schließt sich die Kontaktierung an. Bei dieser werden die Ableiterföhnchen der aufeinandergestapelten Elektroden miteinander verschweißt. Dabei werden jeweils die Anoden- bzw. die Kathodenableiterföhnchen mit einem Ableiterblech verschweißt. Dieser Stapel wird in eine tiefgezogene Pouchfolie eingelegt und

an drei Seiten versiegelt. Nach dem Verpackungsschritt wird die Zelle mit Elektrolyt befüllt, sodass die Zelle daraufhin an allen Seiten verschlossen werden kann.

Nach dem Zusammenbau der Zelle wird diese aktiviert. Hierbei erfolgt zunächst die Formierung, das erstmalige Be- und Entladen der Zelle. Abhängig von der Zellchemie ist daraufhin gegebenenfalls die Zelle zu entgasen und final zu verschließen. Abschließend erfolgen die Alterung und eine finale Kontrolle der Zelle.

Bei der Elektrodenfertigung sind insbesondere Herausforderungen der Verfahrenstechnik und der Materialentwicklung zu lösen. Beim Zusammenbau der Zelle stehen vorwiegend Fragestellungen des Maschinenbaus und der Produktionstechnik im Vordergrund, wohingegen beim Aktivieren Themenfelder der Elektrochemie und der Elektrotechnik zu adressieren sind. Im Kontext dieser Arbeit stehen produktionstechnische Fragestellungen im Vordergrund, sodass der Zusammenbau der Zelle von besonderem Interesse ist. Innerhalb des Zusammenbaus der Zelle stellt das präzise, materialschonende Stapeln der biegeschlaffen Materialien, die Stapelbildung, die größten Herausforderungen dar und weist zudem einen hohen Einfluss auf die Eigenschaften der Zelle auf (Kampker 2014, S. 97; Baumeister 2017, S. 20). Daher wird im Folgenden die Stapelbildung näher erörtert.

## **2.3 Stapelbildungsverfahren**

Aufgrund der elementaren Bedeutung des Prozessschrittes der Stapelbildung auf die Leistungseigenschaften einer Zelle und der Anforderungen an diesen Prozessschritt werden im Folgenden verschiedene Herstellungsverfahren der Stapelbildung vertieft diskutiert, insbesondere hinsichtlich ihrer Eignung zur Herstellung von großformatigen Zellen. Da die Stapelbildungsverfahren in starker Wechselwirkung mit dem zu bildenden Stapeldesign stehen, wird zudem das jeweilig realisierbare Stapeldesign erläutert. Zunächst werden Anforderungen an Stapeldesign und Stapelbildungsverfahren diskutiert.

### **2.3.1 Anforderungen Stapeldesign**

In Abbildung 2-11 sind die wesentlichen Anforderungen an das Stapeldesign dargestellt. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

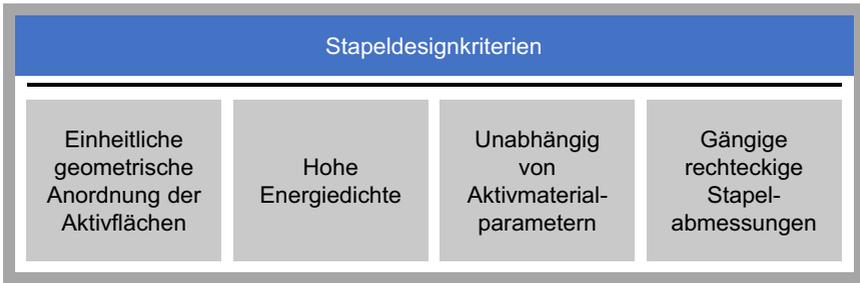


Abbildung 2-11 Stapeldesignkriterien

- Eine einheitliche geometrische Anordnung der Aktivflächen bedeutet, dass die Flächenpressung auf die Aktivflächen der Elektroden homogen ist. Diese Flächenpressung muss innerhalb des gesamten Stapels homogen sein. Eine ungleichmäßige Pressung einer Elektrodenlage würde das Dendritenwachstum begünstigen und ist somit zu vermeiden (Bach & Schuster et al. 2016, S. 11). Zudem ist eine gleichmäßige Ausdehnung der Aktivflächen der Elektroden möglich. Diese Eigenschaft ermöglicht dem Zellstapel beim Atmen, der Volumenänderung beim Be- und Entladevorgang, die gleichmäßige Flächenpressung der Elektroden auch im Betrieb aufrecht zu erhalten. Die einzelnen Stapellagen sind so anzuordnen, dass sich keine Hohlräume dazwischen befinden. Dies bedeutet, dass die Lagen der Elektroden und Separatoren unmittelbar aufeinander liegen, damit sich keine lokal unterschiedlichen Widerstände zwischen den Einzellagen ausbilden. Des Weiteren sind zur Vermeidung lokal unterschiedlicher Widerstände die Aktivflächen der Elektroden eindeutig gegenüberliegend anzuordnen.
- Es besteht eine möglichst hohe Energiedichte. Dies bedeutet, dass die inaktiven Materialien und Flächen des Stapels minimal ausgeprägt sind.
- Der Stapelaufbau sollte unabhängig von den mechanischen Materialeigenschaften der Aktivmaterialien der Elektroden sein. Dies bedeutet, dass Änderungen der mechanischen Eigenschaften der Aktivmaterialien der Elektroden möglichst keine Änderungen des Stapelaufbaus hervorrufen. Daher sollte der zu konzipierende Stapel in seinem Aufbau keine Wirkzusammenhänge mit den mechanischen Materialparametern der Aktivmaterialien aufweisen. Begründet ist dies zum einen in der hohen Dynamik der Materialentwicklung von Batteriezellen, sodass der Stapelaufbau auch für veränderte, neue Materialrezepturen Anwendung

finden kann. Zum anderen sollen sowohl dünne als auch dicke Aktivmaterialschichten im Stapelaufbau realisiert werden können. Hiermit wird dem Trend zu dicker werdenden Aktivmaterialschichten im Stapelaufbau Rechnung getragen.

- Das Stapeldesign weist eine rechteckige Grundfläche auf. Dies ist durch die dadurch realisierbare Bauraumausnutzung bei Batteriemodulen begründet. Die Abmessungen des Stapels sollen sich an den derzeit gängigen Stapeldimensionen prismatischer Hard-Case- und Pouchzellen orientieren.

### 2.3.2 Anforderungen Stapelbildungsverfahren

Die wesentlichen Anforderungen an ein Stapelbildungsverfahren sind in Abbildung 2-12 dargestellt. Diese werden nachfolgend diskutiert.

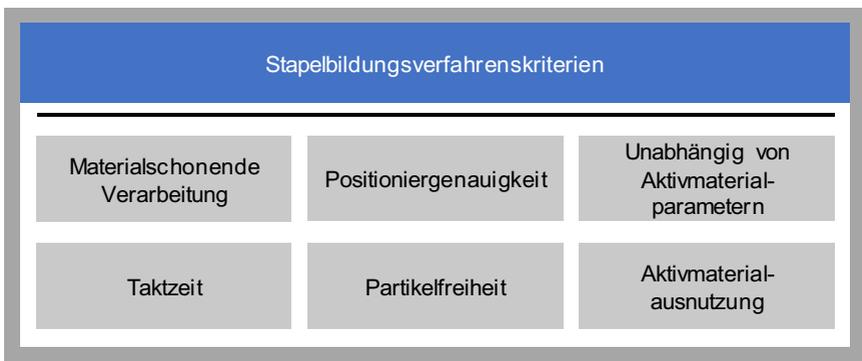


Abbildung 2-12 Anforderungen Stapelbildungsverfahren

- Bei einer materialschonenden Verarbeitung dürfen durch die Herstellung des Zellstapels keine Beschädigungen der Elektrodenflächen hervorgerufen werden. Dies bedeutet unter anderem, dass möglichst keine Reibung zwischen Werkzeugkomponenten und Elektrodenflächen auftritt. Des Weiteren dürfen die Mindestbiegeradien der Elektroden nicht unterschritten werden, da dies zu Abplatzungen der Aktivflächen führen würde (Kampker 2014, S. 73). Verunreinigungen oder Beschädigungen der Elektrodenflächen können die Leistungsfähigkeit der Batteriezelle beeinträchtigen. Des Weiteren ist eine materialschonende Verarbeitung des Separators während der Stapelbildung notwendig, damit dieser frei von

Beschädigungen ist, da ansonsten die Gefahr von Kurzschlüssen in der Batteriezelle besteht (Baumeister 2017, S. 32).

- Die Stapelbildung ist partikelfrei zu realisieren, da Partikel innerhalb des Stapels zu Kurzschlüssen oder/und zu einer Verringerung der Leistungsfähigkeit führen können. Zudem ist bei der Stapelbildung eine Gratbildung bei den Materialbahnen zu vermeiden, da dies ebenfalls zu Beschädigungen des Separators führen kann.
- Durch die Positioniergenauigkeit der einzelnen Lagen bei der Stapelbildung ist sicherzustellen, dass sich die Aktivflächen der Elektroden überdecken. Ist die maßgenaue Ablage der Elektrodenflächen zueinander nicht gegeben, werden die elektrochemischen Reaktionen in der Zelle beeinträchtigt (Reinhart & Zeilinger et al. 2013, S. 6; Schmitt & Raatz et al. 2014). Bei einer nicht exakten Positionierung kann Lithium-Plating hervorgerufen und somit die Sicherheit und die Lebensdauer der Zelle beeinträchtigt werden (Vetter & Novak et al. 2005, S. 272). Dies bedeutet, dass bei rechteckigen Aktivmaterialgrundflächen der Elektroden diese zueinander parallele Kanten und einen sich überdeckenden Mittelpunkt aufweisen müssen. Zudem ist bei der Ablage der Materialbahnen auf den Stapel darauf zu achten, dass keine Aufwölbungen und damit keine Hohlräume der Einzellagen hervorgerufen werden (Holl & Schreiber et al. 2014, S. 70).
- Analog zum Stapeldesign sollte der Herstellungsprozess des Stapels unabhängig von den mechanischen Materialparametern der Elektrodenbeschichtung sein, siehe Kapitel 2.3.1.
- Für eine wirtschaftliche Produktion ist die Taktzeit der Stapelbildung von Relevanz. Zudem sind hierbei die Kosten für die Produktion des Stapels im Trockenraum zu beachten.
- Zudem ist die Aktivmaterialausnutzung der Elektroden bei der Stapelbildung für eine wirtschaftliche und ressourcenschonende Produktion von Bedeutung. Dies bedeutet, dass die Erzeugung von Aktivmaterialresten beispielsweise bei einer Konfektionierung der Elektrodenmaterialbahnen vermieden werden sollte.

Nachfolgend werden die in Abbildung 2-13 ersichtlichen Stapelbildungsverfahren erläutert



Abbildung 2-13 Übersicht Stapelbildungsverfahren

### 2.3.3 Einzelblattstapeln

Beim Stapelprozess nach dem Prinzip des Einzelblattstapeln müssen zunächst die nach der Elektroden- und Separatorherstellung kontinuierlich vorliegenden Materialbahncoils zu Einzelblättern konfektioniert werden, siehe Abbildung 2-14 links. Hierfür können die Elektrodenmaterialbahnen sowohl kontinuierlich als auch intermittiert beschichtet vorliegen. Die Verarbeitung von doppelseitigen Beschichtungen ist möglich. Liegen intermittierende Beschichtungen vor, wird die Konfektionierung entsprechend realisiert, dass sich die Kontur der Ableiterföhnchen im nicht beschichteten Bereich befindet. Für das Konfektionieren der Einzelblätter aus den Elektrodenmaterialbahnen kommen Bandstahlschneiden, Laserschneiden sowie Stanzen als Trennverfahren zum Einsatz (Kurfer & Westermeier et al. 2012b, Baumeister & Fleischer 2014). Während des Konfektionierens müssen entstehende Schneidpartikel abgesaugt werden, zudem muss anschließend eine Reinigung der Einzelblätter erfolgen. Die zu realisierende Kontur der Elektrodeneinzelblätter weist einen rechteckigen mit Aktivmaterial beschichteten Bereich und zudem einen kleineren rechteckigen nichtbeschichteten Bereich der Ableiterföhnchen auf. Die Kontur des Separator-Einzelblatts ist rechteckig ausgeführt, siehe Abbildung 2-14 links. Das Abtrennen des Separators wird daher in der Regel mit kontinuierlichem Messerschnitt mit keramischem Messer durchgeführt. Üblicherweise er-

folgt ein Zwischenlagern der Einzelblätter in Magazinen, welche dem eigentlichen Stapelvorgang zugeführt werden. Beim Stapeln wird das gemäß der Stapelreihenfolge benötigte Einzelblatt aus dem jeweiligen Magazin durch ein Handhabungssystem entnommen, Abbildung 2-14 rechts. Für die exakte Positionierung des Einzelblattes auf dem Stapel wird nach der Entnahme aus dem Magazin die Orientierung und die Position bestimmt, sodass eine Ausrichtung des Einzelblattes durchgeführt werden kann. Damit ein Verrutschen des Verbundes vermieden wird, muss dieser während des gesamten Stapelvorgangs niedergehalten werden. Beim Entnehmen eines Einzelblattes aus dem Magazin ist aufgrund der Anhaftung der sich darin befindlichen Einzelblättern zueinander eine gleichzeitige Entnahme mehrerer Lagen zu vermeiden. Ein Ansatz zur Detektion der Aufnahme von Mehrlagen ist die Verwendung von Wirbelstromsensoren im Greifer (Schmitt 2015, S. 187, Schmitt & Raatz 2014, S. 318). Zur Reduktion der Partikelkontamination beim Greifen wurde in (Stühm & Tornow et al. 2014, S. 163) ein neuer Greifer vorgestellt, welcher auf dem Bernoulli-Prinzip beruht. Oftmals erfolgt die Handhabung mittels Pick-and-Place-Robotern. Zur Reduktion der notwendigen Handhabungs-Kinematiken und der erforderlichen Prozessabfolge der Einzelblätter mit Positionserkennung und Positionierung wurde in (Baumeister 2017) ein neuartiger Ansatz zur Prozessfolge der Einzelblattstapelbildung vorgestellt. Hierbei ermöglicht ein funktionsintegriertes Stanzwerkzeug die direkte Ablage der Einzelblätter auf dem Stapel, sodass keine Magazinierung dieser notwendig ist und auf eine Positionserkennung und Ausrichtung der Einzelblätter verzichtet werden kann.

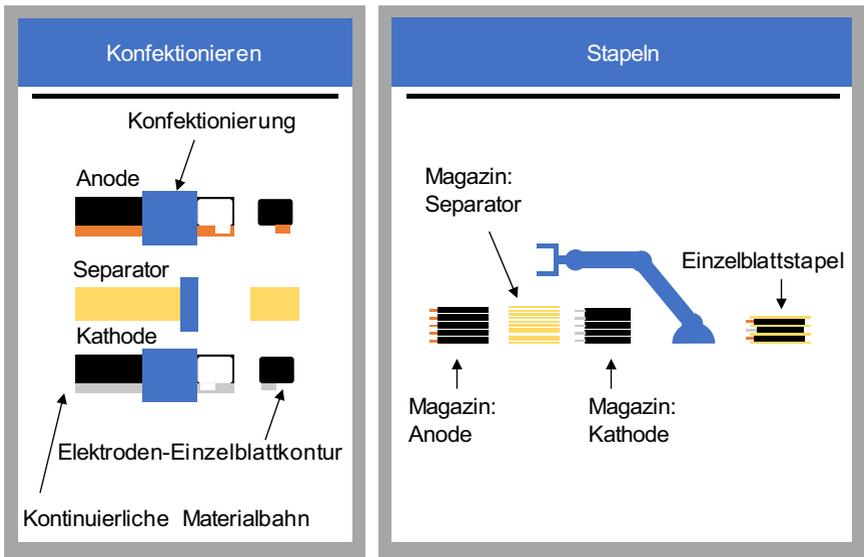


Abbildung 2-14 Einzelblattstapelbildung

Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der Einzelblattstapelbildung diskutiert.

Ein Vorteil der Einzelblattstapelbildung ist das durch das realisierbare Stapelformat resultierende volumetrische und gravimetrische Verhältnis von aktiven Materialien zu inaktiven Materialien im Stapel, sodass eine hohe Energiedichte erzielbar ist. Zudem ermöglicht das Stapeldesign eine flache Ablage der Elektroden- und Separatorblätter, wodurch keine mechanische Beanspruchung der Materialbahnen, wie beispielsweise Biegeradien, hervorgerufen wird. Es wird somit eine homogene Druckverteilung im Stapel ermöglicht. Generell können bessere Leistungs- und Lebensdauereigenschaften erzielt werden, wenn eine homogene Druckverteilung innerhalb der Zelle, insbesondere zwischen den Aktivmaterialflächen, herrscht (Bach & Schuster et al. 2016, S. 11; Holl & Schreiber et al. 2014, S. 69). Des Weiteren bietet das Einzelblattverfahren die Möglichkeit der Verarbeitung von dicken Elektroden.

Nachteilig beim Einzelblattstapeln sind die bei der Konfektionierung entstehenden Schneidpartikel, die trotz aufwändiger Reinigungsschritte in den Zellstapel eingebracht werden können. Damit einhergehend entstehen Gefahren wie beispielsweise ein mögliches Durchstoßen einer Separatorschicht. Durch den Grat des Elektrodenrandes resultiert ebenfalls dieses Gefahrenpotenzial (Schmitt & Raatz 2014). Zudem entstehen

beim Konfektionieren der Einzelblätter Elektrodenmaterialgitterreste, sodass in der Regel keine vollständige Verarbeitung der Elektrodenmaterialien realisiert werden kann. Nachteilig bei der Einzelblattstapelbildung ist die Anzahl an aufwendigen Prozessschritten zur Erzeugung, Reinigung, Positionserkennung und Positionierung für jedes einzelne Blatt. Die hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit der einzelnen Lagen über den kompletten Stapel sind durch entsprechend komplexe Handhabungs- und Steuerungskomponenten zu realisieren. Hierbei stellt die Handhabung der dünnen biegeschlaffen Einzelblätter eine Herausforderung dar.

In Abbildung 2-15 ist die Bewertung des Einzelblattstapels hinsichtlich der Stapeldesign- und Stapelbildungsverfahrenskriterien zusammengefasst.

| Stapeldesignkriterien   | Einzelblattstapel |
|---|-------------------|
| Eindeutige einheitliche geometrische Anordnung der Aktivmaterialflächen | ●                 |
| Hohe Energiedichte  | ●                 |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern                                  | ●                 |
| Gängige rechteckige Stapelabmessungen                                   | ●                 |
| Stapelbildungsverfahrenskriterien                                       | Einzelblattstapel |
| Materialschonende Verarbeitung  | ◐                 |
| Positioniergenauigkeit  | ◑                 |
| Taktzeit  | ◒                 |
| Partikelfreiheit  | ◒                 |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern                                  | ●                 |
| Aktivmaterialausnutzung   | ◑                 |



Erfüllt Anforderung nicht



Erfüllt Anforderung vollständig

Abbildung 2-15 Bewertung Einzelblattstapeln

### 2.3.4 Z-Falten

Bei der Stapelbildung mittels Z-Falten werden sowohl die Elektrodenmaterialbahnen als auch die Separatormaterialbahn kontinuierlich verarbeitet. Die Elektroden sind hierbei kontinuierlich beschichtet. Prozessbedingt können allerdings nur einseitig beschichtete Elektrodenmaterialbahnen verwendet werden, da bei der Verwendung von doppelseitigen Beschichtungen Kathodenaktivmaterialflächen sich unmittelbar gegenüberliegen würden. Dasselbe gilt für Anodenaktivmaterialflächen. Beim Prozessablauf des Z-Faltens werden die drei kontinuierlichen Materialbahnen gleichzeitig verarbeitet. Hierbei werden die Materialbahnen auf einen Maschinentisch fixiert. Anschließend werden diese durch eine Bewegung des Tisches abgerollt, über einen Niederhalter um 180° umgelenkt und auf den Stapel geklemmt. Durch diese Prozessabfolge entsteht ein kontinuierliches zickzackförmiges Stapeldesign, siehe Abbildung 2-16. Alternativ zur Bewegung des Maschinentisches kann eine Bewegung der Materialzuführung für den Faltvorgang realisiert werden.

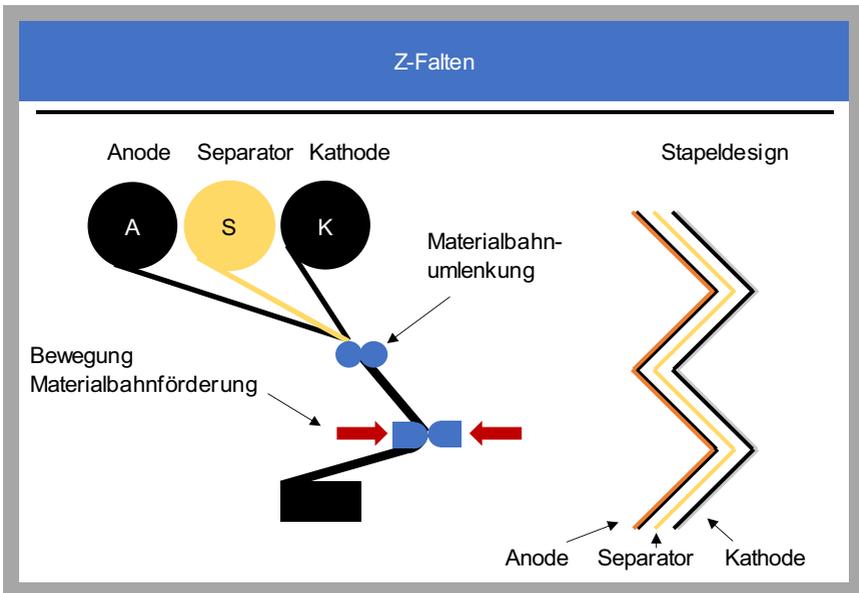


Abbildung 2-16 Z-Falten

Nachfolgend sind die Vor- und Nachteile beim Z-Falten aufgeführt.

Ein Vorteil beim Prozessablauf des Z-Faltens ist die Verarbeitung von kontinuierlichen Materialbahnen, sodass eine kurze Prozesskette zur Stapelbildung notwendig ist. Durch die Verarbeitung der kontinuierlichen Materialbahnen fallen keine Aktivmaterialgitterreste an, zudem wird keine Konfektionierung benötigt, sodass die von Schneidpartikeln ausgehenden Gefahren vermieden werden.

Nachteilig ist, dass nur einseitig beschichtete Elektrodenmaterialbahnen verwendet werden können. Dies führt dazu, dass kein optimales volumetrisches und gravimetrisches Verhältnis von aktiven zu inaktiven Materialien im Stapel erreichbar ist. Daraus resultiert letztendlich eine niedrige Energiedichte. Des Weiteren erfolgt beim Z-Falten eine mechanische Beanspruchung der Aktivmaterialien im Faltungsbereich, wodurch Abplatzungen und Partikelabbrüche verursacht werden können, welche zu Funktionsbeeinträchtigungen der Zelle führen können. Ebenso wird der Separator im Faltungsbereich beansprucht. Hierbei gilt es insbesondere bei keramischen Separatormaterialien einen Sprödbruch zu vermeiden (Zhang 2007, S. 359). Durch den Faltungsbereich und die dort resultierenden mechanischen Beanspruchungen werden Restriktionen an die Verarbeitbarkeit der Elektroden- und Separatormaterialien gestellt.

Die aus den Ausführungen resultierende Bewertung des Z-Faltens ist in Abbildung 2-17 ersichtlich.

| Stapeldesignkriterien   | Z-Falten |
|---|----------|
| Eindeutige einheitliche geometrische Anordnung der Aktivmaterialflächen |          |
| Hohe Energiedichte  |          |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern                                  |          |
| Gängige rechteckige Stapelabmessungen                                   |          |

| Stapelbildungsverfahrens-kriterien     | Z-Falten |
|--|----------|
| Materialschonende Verarbeitung         |          |
| Positioniergenauigkeit                 |          |
| Taktzeit                               |          |
| Partikelfreiheit                       |          |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern |          |
| Aktivmaterialausnutzung                |          |

Erfüllt Anforderung nicht    Erfüllt Anforderung vollständig

Abbildung 2-17 Bewertung Z-Falten

### 2.3.5 Z-Falten mit Einzelblättern

Das Z-Falten mit Einzelblättern ist eine Kombination der in Kapitel 2.3.3 und 2.3.4 vorgestellten Verfahren des Einzelblattstapels und des kontinuierlichen Z-Faltens. Hierbei wird der Separator als kontinuierliche Materialbahn verarbeitet. Die Einzelblätter werden zunächst konfektioniert, analog der Einzelblattstapelbildung, sodass dieselben

Elektrodenausgangsmaterialbahnen wie beim Einzelblattstapel verwendet werden können, siehe Kapitel 2.3.3. Zu Beginn der Stapelbildung wird die kontinuierliche Separatormaterialbahn auf einem Maschinentisch fixiert. Anschließend wird ein Elektrodenblatt auf den Separator positionsgenau abgelegt und temporär geklemmt, sodass ein Verrutschen des Blattes während des Prozesses verhindert wird. Das Handhaben der Einzelblätter erfolgt in der Regel mittels Pick-and-Place-Roboterkinematiken. Durch eine Bewegung des Maschinentisches wird der Separator über dem Einzelblatt abgelegt und anschließend niedergehalten. Alternativ kann diese Bewegung analog zum kontinuierlichen Z-Falten auch mittels einer Bewegung der Materialförderung des Separators realisiert werden. Das Falten erfolgt entsprechend durch die 180°-Umlenkung der Separatorbahn um einen Niederhalter. Durch das alternierende Ablegen von Anoden- und Kathodeneinzelblättern und das dazwischen durchgeführte Falten des kontinuierlichen Separators entsteht der in Abbildung 2-18 dargestellte Stapelaufbau mit einem kontinuierlichen zickzackförmig angeordneten Separator und darin angeordneten Elektroden-einzelblättern.

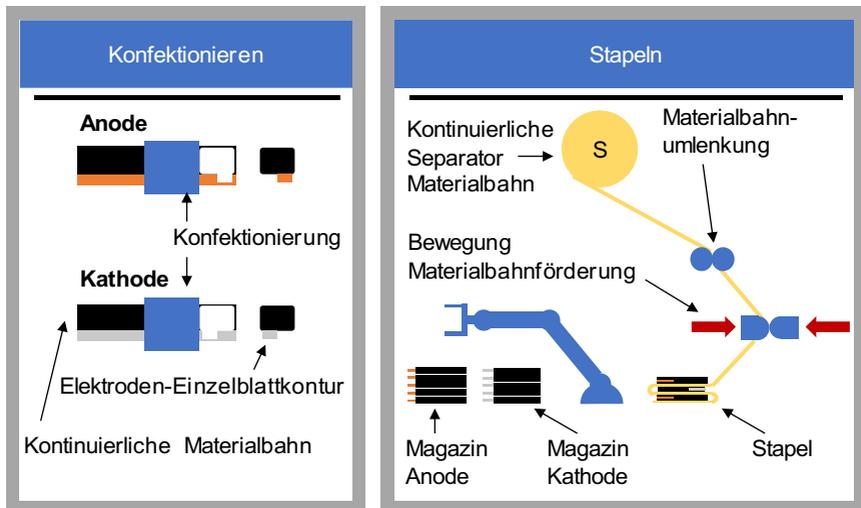


Abbildung 2-18 Z-Falten mit Einzelblättern

Untersuchungen des Z-Faltprozessablaufs zeigen einen großen Einfluss der Bahnspannung beim Umlenken des Separators auf (Schmitt 2015, S. 170). Zudem bestehen

Wechselwirkungen der Bahnspannung mit der Tischgeschwindigkeit sowie dem zu verarbeitenden Separatormaterial (Kurfer & Westermeier et al. 2012a, S. 37). Des Weiteren hat beim Umlenken der Separatormaterialbahn der Niederhalter einen signifikanten Einfluss. Hierbei gilt es, ein Optimum zwischen der Fixierung des Stapels und der Vermeidung von Belastungen des Separators zu finden (Techel 2011, S. 41). Für das Z-Falten ist ein Verständnis der Prozessparameterzusammenhänge wichtig, insbesondere die Auswirkungen von Positionierfehlern der Elektroden und die daraus resultierenden Effekte (Schmitt & Raatz et al. 2014). Eine Optimierung des Z-Faltens ist beispielsweise durch eine selektive Elektrodenblattauswahl möglich (Schmitt & Raatz et al. 2014). Zudem hat die Auswahl der eingesetzten Greiftechnologie Einfluss auf den Prozessablauf (Reinhart & Kurfer 2011). In der Anlage zur Stapelbildung sind Qualitätssicherungsmaßnahmen zu integrieren (Westermeier & Reinhart et al. 2013; Kurfer & Westermeier et al. 2012b). Darüber hinaus gibt es neue Anlagenkonzepte für das Z-Falten mit Einzelblättern (Schröder & Aydemir et al. 2016). Hierbei erfolgt die Förderung der Einzelblätter rollenbasiert, sodass eine höhere Prozessgeschwindigkeit ermöglicht wird (Aydemir & Bach et al. 2015). Die Faltung und Förderung des Separators wird dabei durch eine neuartige Greifkinematik realisiert und nicht über eine Bewegung des Maschinentisches (Schröder & Glodde et al. 2015).

Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile des Z-Faltens mit Einzelblättern erläutert. Ein Vorteil ist das Stapeldesign, welches aufgrund des kontinuierlich ausgeführten Separators zwischen den Elektrodenblättern eine höhere Robustheit aufweist. Des Weiteren sind mittels Z-Falten mit Einzelblättern durch die Verwendung von beidseitig beschichteten Elektroden hohe Energiedichten realisierbar, wenngleich im Faltungsbereich ein im Vergleich zum Einzelblattstapel größerer Bereich mit inaktivem Material, dem Separator, erforderlich ist. Aufgrund der Verwendung von Elektrodeneinzelblättern können dicke Elektroden verarbeitet werden.

Nachteilig sind die potenziellen Gefahren durch die bei der Konfektionierung entstehenden Schneidpartikel und Grate an den Elektroden. Ebenso entstehen hierbei Aktivmaterialgitterreste. Zudem erfordert das Stapelbilden aufwendige Handhabungsvorgänge der Einzelblätter und eine hohe Anzahl an notwendigen Prozessschritten vom Konfektionieren bis zum Positionieren der Einzelblätter auf dem Separator. Zusätzlich ist eine Faltungskinetik für den Separator notwendig, sodass eine Vielzahl an sequenziellen Prozessschritten erforderlich ist, was sich entsprechend in der notwendigen Taktzeit für die Stapelbildung niederschlägt.

Aus den diskutierten Vor- und Nachteilen folgt die in Abbildung 2-19 ersichtliche Bewertung des Z-Faltens mit Einzelblättern (EZB).

| Stapeldesignkriterien   | Z-Falten mit EZB |
|---|------------------|
| Eindeutige einheitliche geometrische Anordnung der Aktivmaterialflächen | ●                |
| Hohe Energiedichte  | ◐                |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern                                  | ●                |
| Gängige rechteckige Stapelabmessungen                                   | ●                |
| Stapelbildungsverfahrenskriterien                                       | Z-Falten mit EZB |
| Materialschonende Verarbeitung  | ◑                |
| Positioniergenauigkeit  | ◐                |
| Taktzeit  | ○                |
| Partikelfreiheit  | ◐                |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern                                  | ●                |
| Aktivmaterialausnutzung   | ◐                |

○ Erfüllt Anforderung nicht      ● Erfüllt Anforderung vollständig

Abbildung 2-19 Bewertung Z-Falten mit Einzelblättern

### 2.3.6 Rundwickeln

Beim Rundwickeln werden die Materialbahnen kontinuierlich verarbeitet. Die Elektroden sind kontinuierlich beidseitig beschichtet. Für das Aufwickeln des Elektroden-Separator-Verbundes werden die Materialbahnen an einem Wickelkern befestigt und anschließend um diesen gewickelt, siehe Abbildung 2-20. Der Kern verbleibt bei Rundzellen in der Regel im Verbund.

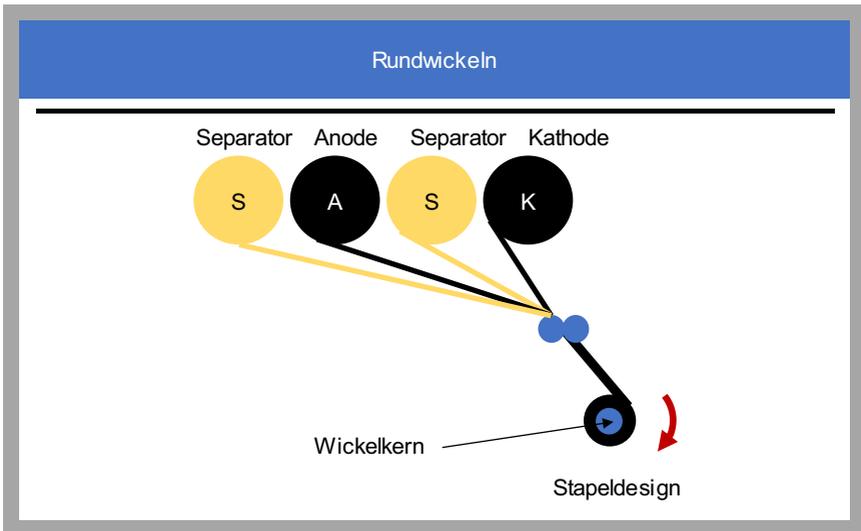


Abbildung 2-20 Rundwickeln

Die Vor- und Nachteile des Rundwickelverfahrens werden nachfolgend aufgeführt.

Ein Vorteil des Rundwickelns ist die einfache, kurze und robuste Prozessabfolge mit hoher Prozessgeschwindigkeit, welche für eine Massenproduktion gut geeignet ist. Hierbei ist keine Konfektionierung der Elektrodenmaterialbahnen zu Einzellagenkonturen notwendig, sodass keine Schneidpartikel und Aktivmaterialgitterreste entstehen. Zudem können doppelseitig beschichtete Elektroden verarbeitet werden, woraus eine entsprechend hohe Energiedichte resultiert.

Nachteilig ist jedoch die Beanspruchung durch die kleinen Biegeradien im Inneren des Wickels. Der benötigte Kern stellt darüber hinaus einen nicht aktiven Bereich des Zellstapels dar. Zudem lassen sich mittels dieses Verfahrens keine großformatigen Stapel mit rechteckiger Grundfläche herstellen. Eine Verwendung von dicken Elektroden

ist bei den zu realisierenden kleinen Biegeradien nicht geeignet (Singh & Kaiser et al. 2015).

In Abbildung 2-21 ist die aus dieser Erörterung resultierende Bewertung des Rundwickelns dargestellt.

| Stapeldesignkriterien   | Rundwickeln   |
|---|---|
| Eindeutige einheitliche geometrische Anordnung der Aktivmaterialflächen |    |
| Hohe Energiedichte  |    |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern                                  |    |
| Gängige rechteckige Stapelabmessungen                                   |    |
| Stapelbildungsverfahrenskriterien                                       | Rundwickeln   |
| Materialschonende Verarbeitung  |    |
| Positioniergenauigkeit  |    |
| Taktzeit  |   |
| Partikelfreiheit  |  |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern                                  |  |
| Aktivmaterialausnutzung   |  |

 Erfüllt Anforderung nicht     Erfüllt Anforderung vollständig

Abbildung 2-21 Bewertung Rundwickeln

### 2.3.7 Flachwickeln

Das Flachwickeln verarbeitet kontinuierliche Materialbahnen. Die Elektrodenmaterialbahnen liegen hierfür kontinuierlich doppelseitig beschichtet vor. Analog dem Rundwickeln, siehe Kapitel 2.3.6, werden die Materialbahnen zunächst an einem Wickelkern fixiert. Im Unterschied zum Rundwickeln wird beim Flachwickeln ein Wickelschwert, Mandrel, verwendet, sodass durch das Umwickeln dieses Schwertes ein prismatischer Stapel erzeugt wird, siehe hierzu Abbildung 2-22. Das Wickelschwert verbleibt üblicherweise nicht im Stapel, es wird nach der Stapelbildung aus dem Elektroden-Separator-Verbund entfernt. Zur Komprimierung des dadurch resultierenden Hohlraums im Stapelinneren wird der Stapel verpresst.

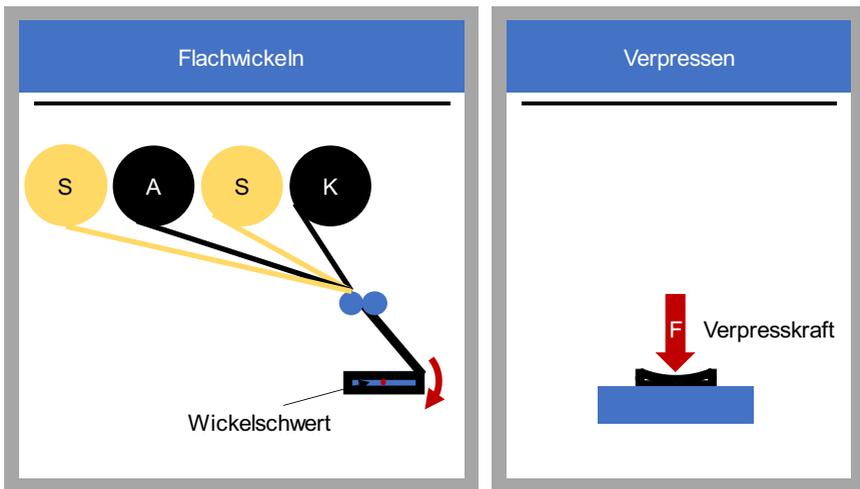


Abbildung 2-22 Flachwickeln

Die Vor- und Nachteile des Flachwickelns werden im Folgenden erörtert.

Vorteilhaft ist die durch den Wickelprozess realisierbare Prozessgeschwindigkeit. Ebenso wie beim Rundwickeln werden die Materialbahnen kontinuierlich verarbeitet, sodass keine Konfektionierung notwendig ist. Durch die Verwendung von kontinuierlich doppelseitig beschichteten Elektroden weist das Stapeldesign eine entsprechend hohe Energiedichte auf.

Nachteilig ist, dass insbesondere in den Bereichen der kleinen Biegeradien das Risiko der partiellen Ablösung der Beschichtungsmasse von der Trägerfolie besteht (Holl &

Schreiber et al. 2014). Zudem können beim Wickeln der kleinen Biegeradien Hohlräume zwischen den einzelnen Lagen entstehen. Diese führen zu Inhomogenitäten der Stromverteilung der Elektroden, sodass Lithium-Plating und verringerte Leistungseigenschaften über die Lebensdauer einer Zelle resultieren können (Tagawa & Brodd 2009). Die partiellen Ablösungen und Inhomogenitäten können zudem über die Lebensdauer Kurzschlüsse verursachen (Kampker & Hohenthanner et al. 2013, S. 241). Ein weiterer Nachteil des Flachwickelns ist, dass beim Entfernen des Wickelschwertes aus dem Stapelverbund ein Teleskopieren der Schichten hervorgerufen werden kann (Holl & Schreiber et al. 2014, S. 55). Zueinander verschobene Lagen können unter anderem Inhomogenitäten in der Druckverteilung der Lagen hervorrufen, was Lithium-Plating und eine verkürzte Lebensdauer zur Folge haben kann (Holl & Schreiber et al. 2014, S. 69). Ebenso kann das Komprimieren des Hohlraumes des Stapels ein Verschieben der einzelnen Lagen verursachen. Zudem stellt das Komprimieren eine mechanische Belastung der Aktivmaterialien, insbesondere der innersten Lagen, dar. Aufgrund der unterschiedlichen resultierenden Drücke auf die Elektroden in den Bereichen der inneren und äußeren Radien werden abweichende Alterungseffekte in diesen Bereichen hervorgerufen (Petzl & Kasper et al. 2015). Aufgrund der kleinen Biegeradien im Stapel-design ist dieses für die Verwendung von dicken Elektroden ungeeignet.

Die aus den Ausführungen resultierende Beurteilung des Flachwickelns ist in Abbildung 2-23 abgebildet.

| Stapeldesignkriterien   | Flachwickeln |
|---|--------------|
| Eindeutige einheitliche geometrische Anordnung der Aktivmaterialflächen |              |
| Hohe Energiedichte  |              |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern                                  |              |
| Gängige rechteckige Stapelabmessungen                                   |              |

| Stapelbildungsverfahrenkriterien       | Flachwickeln |
|--|--------------|
| Materialschonende Verarbeitung         |              |
| Positioniergenauigkeit                 |              |
| Taktzeit                               |              |
| Partikelfreiheit                       |              |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern |              |
| Aktivmaterialausnutzung                |              |

Erfüllt Anforderung nicht    Erfüllt Anforderung vollständig

Abbildung 2-23 Bewertung Flachwickeln

### 2.3.8 Stackwinding

Beim Stackwinding wird eine Separatormaterialbahn kontinuierlich verarbeitet. Die Elektroden werden als Einzelblätter doppelseitig beschichtet benötigt, sodass zunächst eine Konfektionierung der Elektrodenmaterialbahnen zu Einzelblättern erfolgen muss. Die Einzelblätter werden beim Stackwinding als sogenannte Bi-Zellen auf der kontinuierlichen Separatormaterialbahn gestapelt. Daher werden neben der kontinuierlichen

Separatormaterialbahn auch Separatoreinzelblätter benötigt. Der Aufbau einer Bi-Zelle besteht abwechselnd aus zwei Separator-, zwei Anodenblättern, einem Kathodenblatt und zwei Separatorblättern, einem Anodenblatt, zwei Kathodenblättern. Diese Bi-Zellen werden mittels eines Wickelschwertes in die kontinuierliche Separatormaterialbahn gewickelt (Koo 2012), siehe Abbildung 2-24. Zur besseren Fixierung der Einzelblätter ist vor dem Wickeln ein Laminieren dieser durchführbar (Koo 2012). Das Verfahren kann als Kombination der Einzelblattstapelbildung und des Flachwickelns gesehen werden.

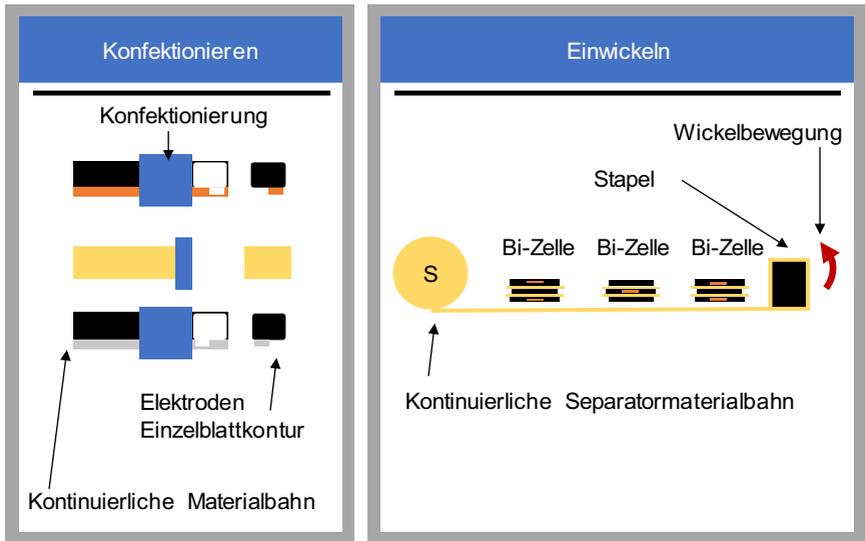


Abbildung 2-24 Stackwindung

Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile des Stackwindings beschrieben.

Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die aufgrund der Verwendung von Elektroden Einzelblättern erzielbare Energiedichte, begründet durch die doppelseitige Elektrodenbeschichtung. Zudem ist der Einsatz von dicken Elektroden möglich.

Ein Nachteil ist die notwendige Konfektionierung der Elektrodenmaterialbahn und die damit verbundenen Defizite, siehe Kapitel 2.3.3. Zudem besteht beim Wickelvorgang die Gefahr eines Verrutschens der Einzelblätter, sodass Inhomogenitäten in der Druckverteilung der Einzellagen und Lithium-Plating hervorgerufen werden können, mit den einhergehenden Nachteilen der Zelleigenschaften, siehe hierzu Kapitel 2.3.7.

In Abbildung 2-25 ist die Bewertung des Stackwindings dargestellt.

| Stapeldesignkriterien   | Stackwinding |
|---|--------------|
| Eindeutige einheitliche geometrische Anordnung der Aktivmaterialflächen |              |
| Hohe Energiedichte  |              |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern                                  |              |
| Gängige rechteckige Stapelabmessungen                                   |              |

| Stapelbildungsverfahrens-kriterien     | Stackwinding |
|--|--------------|
| Materialschonende Verarbeitung         |              |
| Positioniergenauigkeit                 |              |
| Taktzeit                               |              |
| Partikelfreiheit                       |              |
| Unabhängig von Aktivmaterialparametern |              |
| Aktivmaterialausnutzung                |              |

Erfüllt Anforderung nicht    Erfüllt Anforderung vollständig

Abbildung 2-25 Bewertung Stackwinding

### 2.3.9 Weitere Stapelbildungsverfahren

Neben den in Kapitel 2.3.3 bis Kapitel 2.3.8 aufgeführten Verfahren bestehen weitere Ansätze an Verfahren und Stapelformen, siehe hierzu (Schmitt 2015, S. 49). Diese beruhen jedoch überwiegend auf Kombinationen und/oder Abwandlungen der hier ausgeführten Stapelbildungsverfahren.

## **2.4 Zusammenfassung und Defizite Stand der Forschung und Technik**

Im Folgenden werden der Stand der Forschung und Technik zusammengefasst sowie die Defizite aufgezeigt. Darauf aufbauend wird der Forschungsbedarf abgeleitet.

### **2.4.1 Zusammenfassung Stand der Forschung und Technik**

Li-Ionen Batteriezellen sind elektrochemische Energiespeicher, ihre Funktionsweise beruht auf dem Prinzip einer galvanischen Zelle. Die wesentlichen Komponenten sind daher Anode, Separator, Kathode und Elektrolyt. Bei Batteriezellen kann zwischen den drei Bauformen der Rundzelle, der prismatischen Hard-Case-Zelle sowie der Pouchzelle unterschieden werden. Für den Einsatz von großformatigen Batteriezellen weisen die Bauformen der prismatischen Hard-Case-Zelle und die Pouchzelle die größten Potentiale auf. Der Produktionsprozess einer solchen großformatigen Zelle kann in drei Hauptabschnitte eingeteilt werden: die Elektrodenherstellung, den Zusammenbau der Zelle und das Aktivieren der Zelle. Bei den Prozessschritten der Elektrodenfertigung (Mischen, Beschichten, Trocknen, Kalandern, Slitting) stehen Materialentwicklung und verfahrenstechnische Fragestellungen im Vordergrund. Der Zusammenbau der Zelle mit den Prozessschritten Zellstapelbildung, Kontaktierung, Verpacken, Elektrolytbefüllung und Zellverschluss stellt vorwiegend produktionstechnische Herausforderungen. Bei den anschließenden Prozessen des Aktivierens der Zelle (Formierung, Entgasen und Verschließen, Alterung, Kontrolle) sind vor allem elektrochemische und elektrotechnische Themen zu adressieren. Aufgrund des produktionstechnischen Kontextes dieser Arbeit ist der Zusammenbau der Zelle von besonderer Relevanz.

Innerhalb der Prozesskette zum Zusammenbau der Zelle stellt die Zellstapelbildung signifikante produktionstechnische Herausforderungen. Zudem ist die Stapelbildung aufgrund der Einflüsse auf die Leistungseigenschaften und die Sicherheit der Zelle ein maßgeblicher Prozessschritt. Durch die Stapelbildung werden zudem vor- und nachgelagerte Prozessschritte bestimmt, so wird beispielsweise das verarbeitbare Beschichtungsmuster durch das Stapeldesign vorgegeben. Derzeit gängige Stapelbildungsverfahren sind Einzelblattstapeln, Z-Falten, Z-Falten mit Einzelblättern, Rundwickeln, Flachwickeln und Stackwinding.

Stapelbildungsverfahren, bei denen Einzelblätter verwendet werden (Einzelblattstapeln, Z-Falten mit Einzelblättern und Stackwinding), weisen den Nachteil auf, dass

durch das Konfektionieren der kontinuierlich hergestellten Elektrodenmaterialbahnen zu Einzelblättern Schneidpartikel erzeugt werden. Diese Schneidpartikel können eine Separatorschicht durchstoßen und somit einen Kurzschluss verursachen. Zudem bestehen potenzielle Gefahren durch den beim Konfektionieren entstehenden Grat der Elektroden-schicht. Ein weiterer Nachteil von Einzelblättern sind die bei der Herstellung erzeugten Aktivmaterialgitterreste. Zudem ist bei der Verwendung von Einzelblättern eine aufwendige Prozesskette von der Konfektionierung über die Reinigung bis hin zum präzisen Ablegen auf dem Stapel mit anschließendem Fixieren zur Vermeidung eines Verrutschens der Lagen verbunden. Ein Vorteil von Einzelblättern ist die hohe realisierbare Energiedichte aufgrund der möglichen Verwendung von doppelseitig beschichteten Elektroden. Zudem ist die Verarbeitung von dicken Elektroden gegeben. Vorteile hinsichtlich der Energiedichte weist insbesondere das Einzelblattstapeln auf, da hierbei ein sehr gutes geometrisches und gravimetrisches Verhältnis von aktiven zu inaktiven Materialien in der Zelle realisiert werden kann. Zudem ist aufgrund der flachen, ebenen Anordnung der Elektroden eine anzustrebende homogene Druckverteilung in der Zelle realisierbar.

Kontinuierliche Verfahren, mit welchen großformatige Stapel mit rechteckiger Grundfläche realisiert werden können, weisen Vorteile durch eine hohe Prozessgeschwindigkeit und eine kurze Prozesskette auf. Dies sind die Verfahren Z-Falten und Flachwickeln. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von kontinuierlichen Elektrodenmaterialbahnen im Stapel ist, dass keine Schneidpartikel erzeugt werden und somit die dadurch potenziell entstehenden Gefahren vermieden werden können. Zudem entstehen keine Aktivmaterialgitterreste. Ein Nachteil bei der Verwendung kontinuierlich beschichteter Elektrodenmaterialbahnen ist die Beanspruchung der Materialbahnen im Faltungs- bzw. Umwicklungsbereich aufgrund der dort zu realisierenden kleinen Biegeradien. Diese Biegeradien können partielle Ablösungen und Ausbrüche der Beschichtung von der Trägerfolie hervorrufen. Des Weiteren ist die Entstehung von Hohlräumen in den Biegebereichen möglich, wodurch Inhomogenitäten im Stapel entstehen können. Zudem werden Inhomogenitäten bei der Druckverteilung zwischen den inneren und den äußeren Faltungsbereichen hervorgerufen. Darüber hinaus kann durch das Entfernen des Wickelschwertes aus dem gebildeten Stapel ein Teleskopieren des Stapels verursacht werden. Die aufgeführten Merkmale in den Biegeradien sowie ein Verrutschen der Lagen zueinander aufgrund des Teleskopierens schlagen sich in verminderten Leistungs- und Sicherheitseigenschaften der Zelle nieder. Aufgrund der zu realisierenden kleinen

Biegegraden und der Beanspruchung durch das Komprimieren des durch das Wickelschwert entstehenden Hohlraums sind diese Verfahren für eine Verwendung von dicken Elektroden nicht geeignet. Mit dem Rundwickeln ist es nicht möglich, großformatige Stapel mit rechteckiger Grundfläche herzustellen.

### **2.4.2 Defizite Stand der Forschung und Technik und daraus abgeleitete Fragestellungen**

Aus den Analysen der Stapeldesigns kann abgeleitet werden, dass die Anforderungen der geometrischen Anordnung der Aktivmaterialflächen dann erfüllt werden, wenn diese eben angeordnet sind, wie dies beim Einzelblattstapeln, Z-Falten mit Einzelblättern und Stackwinding der Fall ist. Zudem besteht bei einer gebogenen Anordnung der Aktivmaterialien, wie beim Z-Falten, Flachwickeln und Rundwickeln, eine Abhängigkeit von deren Materialparametern.

Die zu den Stapeldesigns mit eben angeordneten Aktivmaterialflächen korrespondierenden Stapelbildungsverfahren weisen jedoch Defizite bei der Aktivmaterialausnutzung auf. Diese Anforderungen werden von Verfahren, welche kontinuierliche Materialbahnen verarbeiten, erfüllt. Ein Defizit, welches aufgrund der Abplatzungen in den Biegebereichen sowohl Verfahren mit kontinuierlichen Materialbahnen als auch aufgrund der Konfektionierung Verfahren mit Einzelblättern aufweisen, ist die Partikelfreiheit.

Dies bedeutet, dass keines der derzeitigen Stapeldesigns mit dazugehörigem Stapelbildungsverfahren die Anforderungen einer rein ebenen Anordnung der Aktivmaterialien unter Verwendung von kontinuierlichen Materialbahnen, bei deren Verarbeitung keine Partikel und Ausbrüche verursacht werden, erfüllt.

Hieraus ergeben sich für diese Arbeit die nachfolgenden Fragestellungen:

- Wie muss ein Stapeldesign gestaltet sein, damit dieses eine hohe Energiedichte und kontinuierliche Materialbahnen aufweist und bei dem zudem, bei einer großformatigen rechteckigen Grundfläche, die Aktivflächen ausschließlich eben zueinander angeordnet sind?
- Wie muss ein Verfahrensablauf zur materialschonenden Herstellung dieses Stapeldesigns definiert sein? Welches sind hierbei die signifikanten Prozessschritte?

- Wie muss die Prozessabfolge für eine präzise 180°-Materialbahnformung bei der Herstellung des Stapelaufbaus definiert sein, ohne dass die Gefahren der Partikelabplatzungen und Aktivmaterialausbrüche hervorgerufen werden?
- Kann die grundlegende technische Machbarkeit dieser Prozessabfolge dargestellt werden?

### **3 Zielsetzung und Vorgehensweise**

Aufbauend auf den im Stand der Forschung und Technik abgeleiteten Defiziten werden in den folgenden Abschnitten die Zielsetzung dieser Arbeit und die zur Zielerreichung angewendete Vorgehensweise erläutert.

#### **3.1 Zielsetzung**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt in der Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen. Basierend auf den Erkenntnissen im Stand der Forschung und Technik weist ein Batteriezellstapel, welcher mit gestapelten Einzelblättern aufgebaut ist, die besten Eigenschaften derzeitiger großformatiger Batteriezellen auf. Dies ist unter anderem durch die Tatsache begründet, dass im Stapel eine homogene Druckverteilung in den Elektrodenlagen herrscht und die Anoden- und Kathodenflächen ausschließlich eben einander gegenüberliegend angeordnet sind. Nachteilig ist bei diesem Stapeldesign, dass bei den entsprechenden Stapelbildungsverfahren durch die Konfektionierung der Elektrodenbahnen zu Einzelblättern Schneidpartikel erzeugt werden und zudem Stanzgitterreste aus kostenintensiven Elektrodenflächen entstehen. Daher gilt es zunächst im Rahmen dieser Arbeit ein Stapeldesign zu entwickeln, welches die positiven Eigenschaften einer einzelblattgestapelten Zelle aufweist und gleichzeitig aus kontinuierlichen Materialbahnen besteht, sodass eine maximale Elektrodenflächenausnutzung der Materialbahnen erzielt wird.

Für dieses neue kontinuierliche Stapeldesign gilt es ein Verfahren zur Herstellung zu definieren. Zur Ableitung eines Verfahrens sind zunächst die Zusammenhänge der Stapelbildung aufzuzeigen, sodass basierend auf diesen ein Verfahren entwickelt werden kann. Aufgrund der kontinuierlichen Materialbahnen und der angestrebten linearen Anordnung der Aktivflächen bei rechteckigem Stapeldesign müssen die Materialbahnen umgefaltet werden. Daher ist der Kern die Entwicklung eines Verfahrensablaufes, welcher die Elektrodenflächen präzise und beschädigungsfrei aufeinander ablegt. Dieser neuartige, auf die Anforderungen der kontinuierlichen Elektrodenverarbeitung ausgerichtete Ablauf wird zunächst systematisch abgeleitet. Anschließend werden die notwendigen Faltungskomponenten konzipiert und abschließend prototypisch realisiert.

### 3.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Erreichung der Ziele dieser Arbeit ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Das Vorgehen untergliedert sich in fünf Schritte.

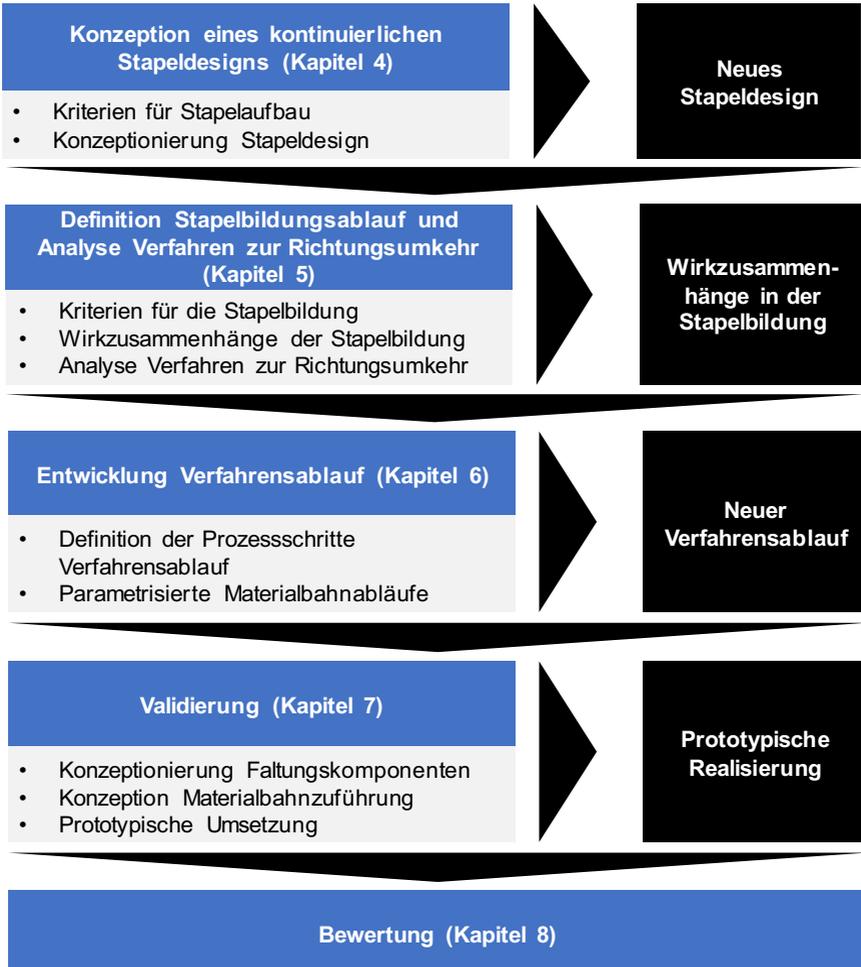


Abbildung 3-1 Grafische Darstellung der Vorgehensweise

Im ersten Schritt erfolgt die Konzeption eines kontinuierlichen Stapeldesigns für großformatige Batteriezellen mit rechteckiger Grundfläche. Hierzu werden zunächst die Zielkriterien für einen Stapelaufbau konkretisiert. Aufbauend auf diesen wird ein Stapeldesign konzipiert, welches die geforderten Kriterien erfüllt (Kapitel 4).

Für dieses neue Stapeldesign werden zunächst die Zielkriterien an ein Fertigungsverfahren aufgestellt. Anschließend erfolgt eine qualitative Ermittlung der Parameterzusammenhänge der Stapelbildung zur Identifikation der signifikanten Fertigungsschritte. Für eine kontinuierliche Stapelbildung mit rechteckiger Grundfläche ist die Faltung der Materialbahnen von elementarer Bedeutung, sodass bestehende Fertigungsverfahren analysiert und auf ihre Anwendbarkeit bzw. Übertragbarkeit für die Herstellung des neuen Stapeldesigns bewertet werden (Kapitel 5).

Basierend auf diesen Analysen wird ein neuer Verfahrensablauf definiert. Hierfür wird der Ablauf zunächst in Einzelschritte unterteilt. Für diese Einzelschritte werden die zu erfüllenden Ziele und Randbedingungen abgeleitet und parametrisierte Materialbahnverläufe aufgestellt (Kapitel 6).

Die parametrisierten Materialbahnverläufe werden an einem konkreten Stapeldesign mit vorgegebenem Beschichtungsmuster angewandt und optimiert. Für die errechneten Materialbahnverläufe des Anwendungsfalls werden passende Technologien ausgewählt und Werkzeugkomponenten entwickelt. Diese sind so zu konzipieren, dass sich die definierten Materialbahnverläufe ergeben. Aufgrund der Tatsache, dass eine kontinuierliche Materialbahn verarbeitet und geformt wird, werden neben den Formungskomponenten noch Komponenten zur Materialabwicklung und Materialbahnförderung benötigt. Diese werden ebenfalls konzipiert und konstruiert. Zudem erfolgt eine prototypische Umsetzung des Faltungsablaufs. Es werden die zuvor definierten Hardwarekomponenten aufgebaut. Anhand dieser erfolgt die Erprobung des konzipierten Verfahrensablaufs (Kapitel 7).

Abschließend werden die Ergebnisse anhand der im Stand der Forschung und Technik abgeleiteten Fragestellungen diskutiert (Kapitel 8).

## 4 Konzeption eines kontinuierlichen Stapeldesigns

In diesem Kapitel wird ein neues Stapeldesign konzipiert, hierfür werden zunächst die Kriterien für dieses definiert.

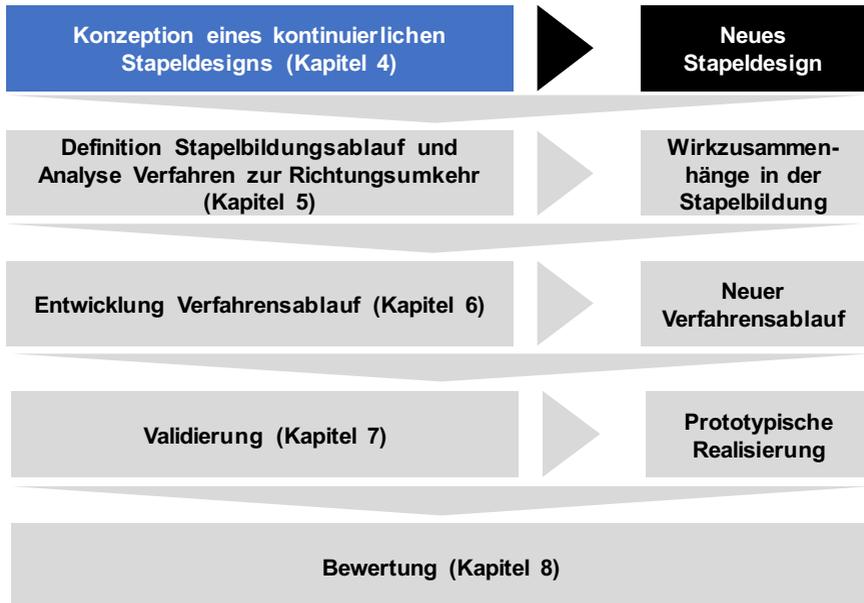


Abbildung 4-1 Vorgehensweise Kapitel 4

### 4.1 Kriterien für den Stapelaufbau

Die Kriterien an einen Stapelaufbau werden aus Kapitel 2.3.1 aufgegriffen und mit den Analysen und abgeleiteten Defiziten aus dem Stand der Forschung und Technik, siehe Kapitel 2.4, konkretisiert. Der neue Stapelaufbau soll daher folgende Eigenschaften aufweisen:

- Die Aktivflächen sind ausschließlich eben geometrisch angeordnet, sodass die Flächenpressung auf die Aktivflächen der Elektroden homogen ist. Eine ungleichmäßige Pressung einer Elektrodenlage ist zu vermeiden, da dies das Dendritenwachstum begünstigt (Bach & Schuster et al. 2016, S. 11). Durch eine ebene Anordnung ist zudem eine gleichmäßige Ausdehnung der Aktivflächen der

Elektroden möglich. Dies ermöglicht die gleichmäßige Flächenpressung im Zellstapel beim Atmen, also der Volumenänderung beim Be- und Entladevorgang, aufrecht zu erhalten. Zur Vermeidung lokal unterschiedlicher Widerstände zwischen den Einzellagen sind diese zum einen so anzuordnen, dass sich keine Hohlräume ausbilden, zum anderen so, dass sich die Aktivflächen eindeutig gegenüberliegen.

- Es besteht eine möglichst hohe Energiedichte. Daher sind die inaktiven Materialien und inaktiven Bereiche des Stapels minimal auszugestalten.
- Der Stapelaufbau besteht aus kontinuierlichen Materialbahnen von Separator, Anode und Kathode. Die Aktivflächen der Ausgangsmaterialbahnen können zu 100 % im Stapel verwendet werden, sodass keine Aktivmaterialreste der Elektroden bei der Stapelbildung erzeugt werden.
- Der Stapelaufbau soll eine Robustheit hinsichtlich der verwendeten kontinuierlichen Materialbahnen aufweisen. Dies bedeutet, dass beispielsweise Fehlstellen in der Beschichtung der Elektrodenmaterialbahnen lokal ausgespart werden können, ohne dass direkt die Elektrodenmaterialbahnlänge für einen gesamten Stapel ausgespart werden muss.
- Des Weiteren soll der Stapelaufbau unabhängig von den mechanischen Materialeigenschaften der Aktivmaterialien der Elektroden sein und eine großflächige rechteckige Grundfläche aufweisen, siehe Kapitel 2.3.1.



Abbildung 4-2 Kriterien Stapeldesign

## 4.2 Konzeptionierung Stapeldesign

Für die zuvor in Kapitel 4.1 aufgeführten Kriterien wird ein Stapelaufbau konzipiert, welcher die geforderten Eigenschaften aufweist.

### 4.2.1 Merkmale Stapeldesign

Die geforderte ausschließlich ebene Anordnung von Aktivmaterialflächen bei gleichzeitiger Verwendung von kontinuierlichen Materialbahnen und der Realisierung eines prismatischen Stapels mit einer großflächigen rechteckigen Grundfläche erfordert eine Formung der Materialbahn. Diese Formungen sind notwendig, damit die Materialbahn von einer ebenen Aktivmaterialflächenanordnung zur nächsten kontinuierlich ausgeführt werden kann. Dieser Formungsbereich bzw. diese Richtungsumkehr steht daher dem Kriterium gegenüber, dass Aktivflächen ausschließlich eben anzuordnen sind. Daher ist die Richtungsumkehr entweder mit sehr großen Radien zu realisieren, sodass diese in Näherung eben ist, oder in diesen Bereichen ist kein Aktivmaterial auf den Materialbahnen aufzubringen. Für die Anordnung der ebenen Aktivmaterialflächen gibt es die Möglichkeiten der einseitigen und der doppelseitigen Beschichtung, siehe Abbildung 4-3.

| Merkmale                                | Lösungsprinzipien       |  |
|---|-------------------------|--|
| <b>Richtungsumkehr</b>                  | Sehr große Radien       | Keine Aktivflächen im Richtungsumkehrbereich |
| <b>Kathodenmaterialbahnbeschichtung</b> | Einseitige Beschichtung | Beidseitige Beschichtung                     |
| <b>Anodenmaterialbahnbeschichtung</b>   | Einseitige Beschichtung | Beidseitige Beschichtung                     |

*Abbildung 4-3 Lösungsmöglichkeiten Stapeldesign*

Das zu konzipierende Stapeldesign soll unabhängig von den mechanischen Materialparametern sein, sodass bei unverändertem Stapeldesign eine Realisierung des Stapels mit unterschiedlichen Aktivmaterialrezepturen und unterschiedlichen Dicken der Aktivschicht der Elektroden möglich ist. Aufgrund der Tatsache, dass kontinuierliche Materialbahnen verwendet werden bei zu erzielenden prismatischen Stapelabmessungen unter Beibehaltung derzeitiger üblicher Abmessungen, sind mehrfache Richtungsänderungen der Materialbahnen im Stapelaufbau notwendig. Auf die Richtungsänderung einer Materialbahn haben die mechanischen Eigenschaften des Materials einen Einfluss, so bestimmen diese beispielsweise einen Mindestbiegeradius, sodass in diesem Fall das Stapeldesign nicht unabhängig von den mechanischen Materialparametern ist (Kampker 2014, S. 73).

Aufgrund der Anforderungen der ausschließlich ebenen Anordnung von Aktivmaterialien und der Unabhängigkeit von mechanischen Aktivmaterialparametern werden ausschließlich Formungsbereiche der Richtungsumkehr weiterverfolgt, welche frei von Aktivmaterialien sind. Zusammenfassend gilt daher, dass das Stapeldesign über eben angeordnete Aktivflächen, welche parallel zur rechteckigen Grundfläche ausgerichtet sind, und über Richtungsänderungsbereiche, welche keine Aktivmaterialien aufweisen, verfügen sollte. Nachfolgend werden Konzepte für Stapelaufbauten erarbeitet und diskutiert, welche die geforderten Charakteristiken aufweisen. Aufgrund der beschriebenen Festlegung des Lösungsprinzips für die Richtungsumkehr ist die Lösungsauswahl für die Beschichtungen zu erarbeiten. Hierfür sind drei prinzipielle Kombination möglich,

zwei einseitige Beschichtungen, zwei beidseitige Beschichtungen sowie eine beidseitige Beschichtung mit einer einseitigen Beschichtung.

#### **4.2.2 Konzepte Stapeldesign**

##### **Konzept 1: Einseitiges Z-Falten mit Intermittierungslücke**

Für das Konzept „Einseitiges Z-Falten mit Intermittierungslücke“ werden zwei einseitige Beschichtungen gewählt, sodass sich die in Abbildung 4-4 dargestellte Lösungsauswahl ergibt. Die Ausgangsmaterialien des Konzepts sind daher eine Separatormaterialbahn, eine einseitig intermittiert beschichtete Kathode und eine einseitig intermittiert beschichtete Anode. Die Intermittierungslücken für die beschichtungsfreie Richtungs-umkehr sind in Abbildung 4-5 dargestellt. Diese weisen zwei unterschiedliche Breiten auf, in Abhängigkeit der zu realisierenden Richtungs-umkehr der Elektroden, siehe Stapelaufbau in Abbildung 4-5. Die nichtbeschichteten Bereiche der Elektroden, an welche im nachfolgenden Prozessschritt die Ableiter angeschweißt werden, sind bei beiden Elektroden seitlich bandförmig vorgesehen. Die entsprechenden Beschichtungsmuster und die Anordnung der Materialbahnen zueinander sind in Abbildung 4-5 dargestellt. Das Konzept „Einseitiges Z-Falten mit Intermittierungslücke“ entspricht daher dem Z-Falten mit einseitig beschichteten Elektroden nach dem Stand der Technik mit neuen, intermittierten Beschichtungsmustern, siehe Kapitel 2.3.4. Hierbei werden die drei kontinuierlichen Materialbahnen z-förmig aufeinandergestapelt, sodass sich ein kontinuierlicher Stapel ergibt. Mit der Verwendung von intermittiert beschichteten Elektroden, bei denen die Faltung und damit die Richtungs-umkehr im nichtbeschichteten Bereich umgesetzt wird, werden die gestellten Anforderungen erfüllt.

**Konzept 1: Einseitiges Z-Falten mit Intermitterungslücke**

| Merkmale                         | Lösungsprinzipien       |  |
|----------------------------------|-------------------------|--|
| Richtungsumkehr                  | Sehr große Radien       | Keine Aktivflächen im Richtungsumkehrbereich |
| Kathodenmaterialbahnbeschichtung | Einseitige Beschichtung | Beidseitige Beschichtung                     |
| Anodenmaterialbahnbeschichtung   | Einseitige Beschichtung | Beidseitige Beschichtung                     |

Abbildung 4-4 Lösungsauswahl Konzept Einseitiges Z-Falten mit Intermitterungslücke

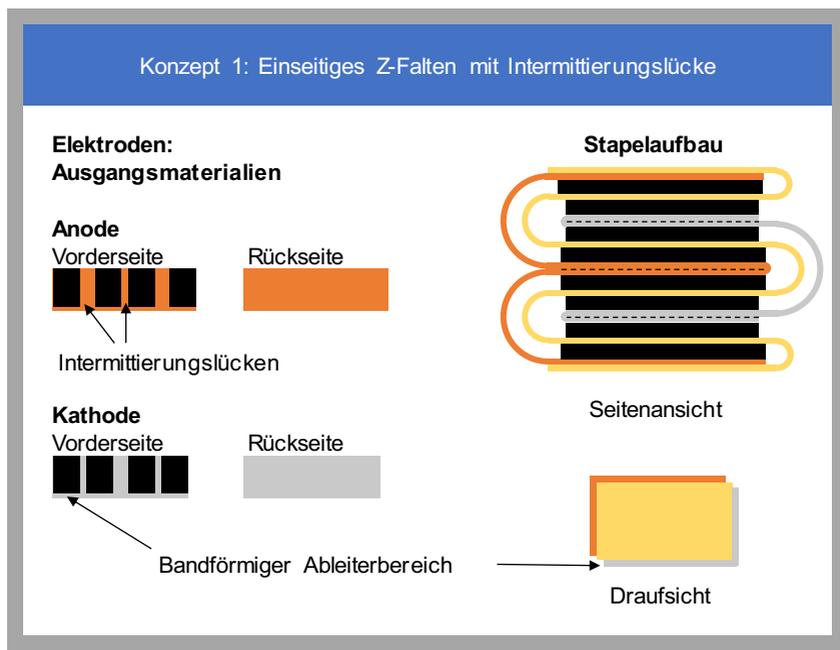


Abbildung 4-5 Konzept 1: Einseitiges Z-Falten mit Intermitterungslücke

**Konzept 2: Flachwickel mit sich ändernder Intermittierungslücke**

Das Konzept „Flachwickel mit sich ändernder Intermittierungslücke“ stellt die Lösungskombination von zwei beidseitigen Beschichtungen da, siehe Abbildung 4-6. Es finden daher vier Materialbahnen, zwei Separatorbahnen, eine doppelseitig beschichtete Anode und eine doppelseitig beschichtete Kathode Verwendung, siehe Abbildung 4-7. Die Elektroden sind intermittiert beschichtet, wobei die Intermittierungslückenbreite nicht konstant ist, sondern sich mit der Stapelhöhe vergrößert. Aufgrund der Lagenanordnung vergrößert sich die Stapelbreite mit zunehmender Stapelhöhe, sodass der Bereich der Richtungsumkehr mit steigender Stapelhöhe größer ausgeführt werden muss. Abbildung 4-7 stellt diesen Sachverhalt dar. Aus diesem Grund weisen sowohl Kathode als auch Anode eine wachsende Intermittierungslückenbreite auf.

**Konzept 2: Flachwickel mit sich ändernder Intermittierungslücke**

| Merkmale                                | Lösungsprinzipien       |  |
|---|-------------------------|--|
| <b>Richtungsumkehr</b>                  | Sehr große Radien       | Keine Aktivflächen im Richtungsumkehrbereich |
| <b>Kathodenmaterialbahnbeschichtung</b> | Einseitige Beschichtung | Beidseitige Beschichtung                     |
| <b>Anodenmaterialbahnbeschichtung</b>   | Einseitige Beschichtung | Beidseitige Beschichtung                     |

Abbildung 4-6 Lösungsauswahl Konzept Flachwickel mit sich ändernder Intermittierungslücke

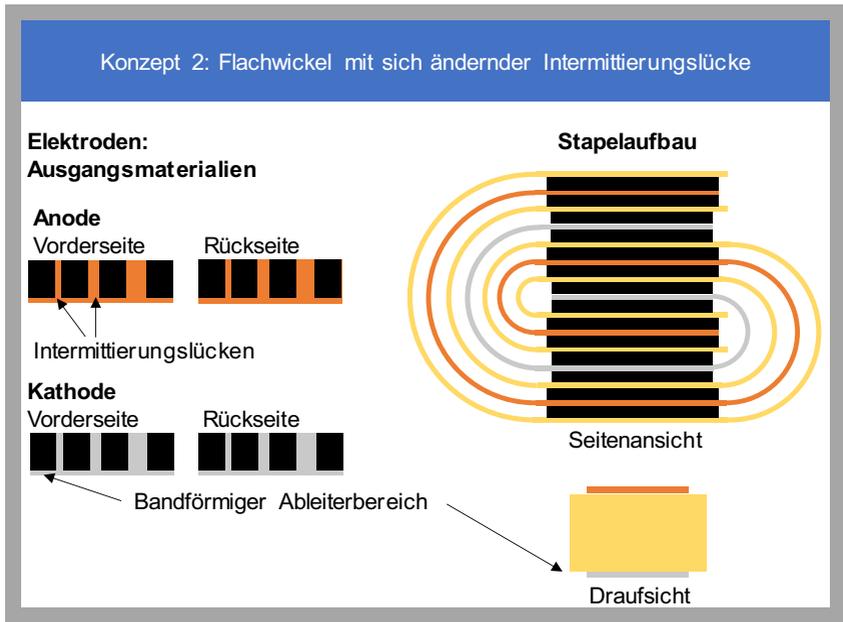


Abbildung 4-7 Konzept 2: Flachwickel mit sich ändernder Intermittierungslücke

### Konzept 3: Zweifaches Z-Falten

Das Konzept „Zweifaches Z-Falten“ ist eine Kombination aus einer einseitigen Beschichtung und einer beidseitigen Beschichtung, sodass sich die in Abbildung 4-8 dargestellte Lösungsauswahl ergibt. Für dieses Konzept werden vier Materialbahnen benötigt, zwei Separatorbahnen, eine einseitig beschichtete Kathode und eine beidseitig beschichtete Anode. Die Anode weist eine konstante Intermittierungslückenbreite auf, wohingegen die Kathode zwei unterschiedliche Intermittierungslückenbreiten hat, deren Breiten jeweils ebenfalls konstant sind. Die beiden unterschiedlichen Intermittierungslücken der Kathode werden immer abwechselnd angeordnet, dies ist durch den Stapelaufbau begründet. Die kleinere Intermittierungslücke der Kathode wird zur Realisierung des beschichtungsfreien Bereichs der Richtungsumkehr benötigt. Die größere Kathodenintermitterungslücke wird sowohl zur Richtungsumkehr als auch zur gleichzeitigen Realisierung des Ableiterfährnchens benötigt, damit in der großen Intermittierungslücke die Ableiter angeschweißt werden können. Daher ist dieser Bereich größer

als der Bereich, welcher nur für eine Richtungsumkehr benötigt wird. Die Anode hingegen ist mit nur einer konstanten Intermittierungslückenbreite versehen, da diese ausschließlich für die Richtungsänderung benötigt wird. Die Ableiterfährchen der Anode sind seitlich angeordnet, die entsprechenden Beschichtungsmuster sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

**Konzept 3: Zweifaches Z-Falten**

| Merkmale                                | Lösungsprinzipien       |  |
|---|-------------------------|--|
| <b>Richtungsumkehr</b>                  | Sehr große Radien       | Keine Aktivflächen im Richtungsumkehrbereich |
| <b>Kathodenmaterialbahnbeschichtung</b> | Einseitige Beschichtung | Beidseitige Beschichtung                     |
| <b>Anodenmaterialbahnbeschichtung</b>   | Einseitige Beschichtung | Beidseitige Beschichtung                     |

*Abbildung 4-8 Lösungsauswahl Konzept Zweifaches Z-Falten*

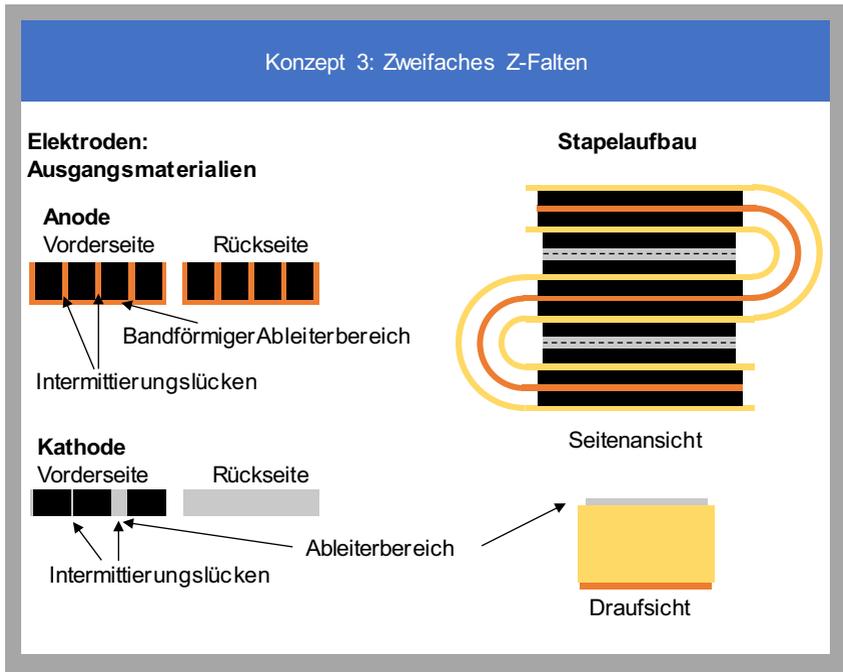


Abbildung 4-9 Konzept 3: Zweifaches Z-Falten

### Bewertung der Konzepte

Die vorgestellten Konzepte werden anhand der in Kapitel 4.1 diskutierten Kriterien der ausschließlich ebenen Aktivmaterialanordnung, Energiedichte, Unabhängig von Aktivmaterialparametern, rechteckige Grundfläche, Verwendung von kontinuierlichen Materialbahnen und der Robustheit bewertet. Die Bewertung der Stapelkonzepte ist in Abbildung 4-10 ersichtlich.

| Konzept   | Ausschließlich ebene Aktivmaterialanordnung | Energiedichte | Unabhängig von Aktivmaterialparametern | Rechteckige Grundfläche | Kontinuierliche Materialbahnen | Robustheit |
|---|---|---------------|--|-------------------------|--------------------------------|------------|
| <b>Konzept 1:<br/>Einseitiges Z-Falten mit Intermittierungslücke</b>        | ●   | ◐             | ●                                      | ●                       | ●                              | ◐          |
| <b>Konzept 2:<br/>Flachwickeln mit sich ändernder Intermittierungslücke</b> | ●   | ◑             | ●                                      | ●                       | ●                              | ◐          |
| <b>Konzept 3:<br/>Zweifaches Z-Falten</b>                                   | ●   | ◑             | ●                                      | ●                       | ●                              | ◐          |

 Erfüllt Anforderung nicht    
  Erfüllt Anforderung vollständig

Abbildung 4-10 Bewertung Konzepte Stapeldesign

Alle drei Konzepte erfüllen die Anforderungen der ausschließlich ebenen Aktivmaterialanordnung, der Unabhängigkeit von Aktivmaterialparametern und der Verwendung kontinuierlicher Materialbahnen gleichermaßen. Unterschiede treten bei den Kriterien Energiedichte und Robustheit auf. Das Konzept Flachwickeln mit sich ändernder Intermittierungslücke weist die besten Eigenschaften hinsichtlich der Energiedichte auf, da in diesem Konzept der Anteil der inaktiven Materialien am geringsten ausfällt. Konzept Einseitiges Z-Falten mit Intermittierungslücke verfügt über zwei einseitig beschichtete Elektrodenmaterialbahnen, Konzept Zweifaches Z-Falten über eine einseitig beschichtete Elektrodenmaterialbahn, dies führt zu Nachteilen in der Energiedichte im Vergleich

zu Konzept Flachwickel mit sich ändernder Intermitterungslücke. Hinsichtlich der Robustheit des Stapelaufbaus sind die Konzepte Einseitiges Z-Falten mit Intermitterungslücke und Zweifaches Z-Falten am besten zu bewerten. Konzept Flachwickel mit sich ändernder Intermitterungslücke ist diesbezüglich nachteilig, da eine Fehlstelle in der Beschichtung dazu führen würde, dass der gesamte Abschnitt einer Elektrodenbahn für einen Stapel ausgeschleust werden muss. Dies ist durch die wachsende Intermitterungslücke begründet, sodass ein Ausschneiden des fehlerhaften Beschichtungsabschnittes und ein anschließendes Spleißen der Materialbahn nicht möglich ist, da dies zu falschen Intermitterungslückengrößen führen würde. Bei Konzept Einseitiges Z-Falten mit Intermitterungslücke und Konzept Zweifaches Z-Falten können die fehlerhaften Beschichtungsstücke ausgeschnitten werden und die Materialbahn wieder zusammengefügt werden, ohne dass dies zu einem veränderten Stapelaufbau führen würde, da das Beschichtungsmuster unabhängig von der Stapelhöhe ist.

Das Konzept Zweifaches Z-Falten bietet somit das größte Potential für ein Stapeldesign, welches die geforderten Zielkriterien (siehe Kapitel 4.1) erfüllt. Daher wird im Folgenden das Konzept Zweifaches Z-Falten weiterverfolgt.

### **4.3 Zusammenfassung der Konzeption eines Stapeldesigns**

Zunächst wurden die Kriterien für den zu erarbeitenden Stapelaufbau konkretisiert. Die Kriterien sind ausschließlich ebene Aktivmaterialanordnung, hohe Energiedichte, Unabhängigkeit von Aktivmaterialparametern, großflächige rechteckige Stapelgrundfläche und prismatische Stapelabmessungen, Verwendung von kontinuierlichen Materialbahnen und Robustheit. Aufgrund der Tatsache, dass kontinuierliche Materialbahnen verwendet werden bei zu erzielenden prismatischen Stapelabmessungen, sind mehrfache Richtungsänderungen der Materialbahnen im Stapelaufbau notwendig. Aufgrund der Anforderungen der ausschließlich ebenen Anordnung von Aktivmaterialien und der Unabhängigkeit von mechanischen Aktivmaterialparametern werden ausschließlich Formungsbereiche der Richtungsumkehr, welche frei von Aktivmaterialien sind, weiterverfolgt.

Basierend auf diesen Anforderungen wurden drei Konzepte für einen Stapelaufbau erarbeitet. Alle drei Konzepte erfüllen die Anforderungen der ausschließlich ebenen Aktivmaterialanordnung, der Unabhängigkeit von Aktivmaterialparametern und der Verwendung kontinuierlicher Materialbahnen gleichermaßen. Unterschiede treten bei den Kriterien Energiedichte und Robustheit auf. Das Konzept Zweifaches Z-Falten wurde

---

als vielversprechendstes Konzept bewertet und wird daher weiterverfolgt. Für dieses Konzept „Zweifaches Z-Falten“ werden vier Materialbahnen benötigt, zwei Separatorbahnen, eine einseitig beschichtete Kathode und eine beidseitig beschichtete Anode. Die Anode weist eine konstante Intermittierungslückenbreite auf, wohingegen die Kathode zwei unterschiedliche Intermittierungslückenbreiten hat. Die beiden unterschiedlichen Intermittierungslücken der Kathode werden immer abwechselnd angeordnet. Im nachfolgenden Kapitel 5 wird ein Verfahrensablauf zur Herstellung des definierten Stapeldesigns Zweifaches Z-Falten erarbeitet.

## 5 Definition Stapelbildungsablauf und Analyse Verfahren zur Richtungsumkehr

In Kapitel 4 wurde die Fragestellung der Gestaltung des Stapeldesigns diskutiert. Im vorliegenden Kapitel 5 werden darauf aufbauend die Fragestellungen der Definition eines Stapelbildungsablaufs zur Herstellung dieses Stapeldesigns sowie die Ableitung der signifikanten Prozessschritte adressiert. Hierzu werden die Kriterien für die Stapelbildung konkretisiert (Kapitel 5.1). Anschließend wird ein Stapelbildungsablauf erarbeitet (Kapitel 5.2). Für diesen Ablauf werden die Wirkzusammenhänge der notwendigen Funktionen und Einflussgrößen qualitativ erstellt (Kapitel 5.3). Basierend auf diesen Wirkzusammenhängen wird der maßgebliche Prozessschritt analysiert. Zudem werden verschiedene Verfahren aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf diesen bewertet (Kapitel 5.4).

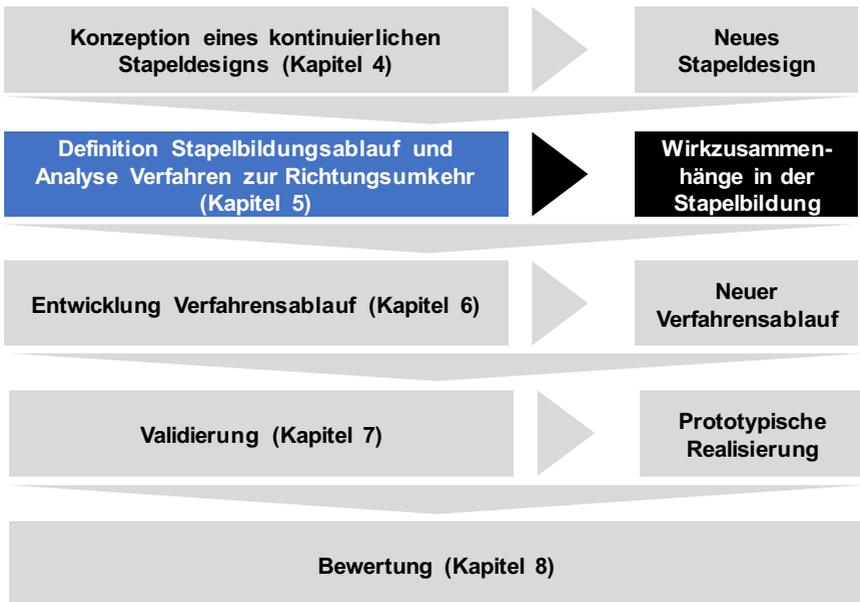


Abbildung 5-1 Vorgehensweise Kapitel 5

## 5.1 Kriterien für die Stapelbildung

Die Anforderungen an Stapelbildungsverfahren wurden im Stand der Technik, Kapitel 2.3.2, diskutiert, siehe Abbildung 5-2. Diese werden im Folgenden unter Berücksichtigung der im Stand der Technik dargelegten Defizite und der daraus abgeleiteten Zielsetzungen sowie des in Kapitel 4.2.2 erarbeiteten Stapeldesigns konkretisiert.

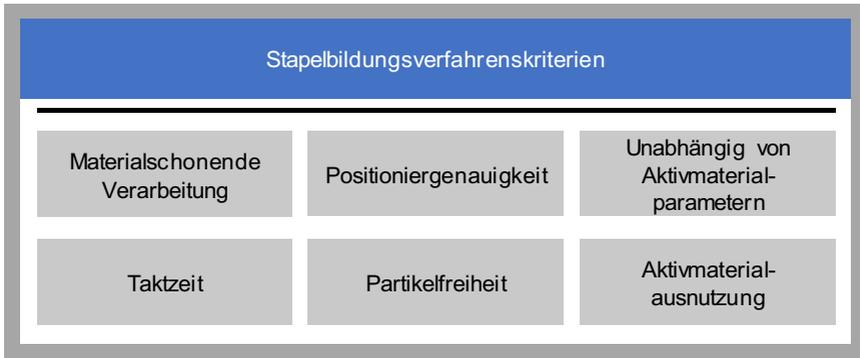


Abbildung 5-2 Kriterien für Stapelbildungsverfahren

- **Materialschonende Verarbeitung:** Es dürfen durch die Herstellung des Zellstapels keine Beschädigungen der Elektrodenflächen hervorgerufen werden. Dies bedeutet unter anderem, dass möglichst keine Reibung zwischen Werkzeugkomponenten und Elektrodenflächen auftritt. Des Weiteren dürfen die Mindestbiegeradien der Elektroden nicht unterschritten werden, da dies zu Abplatzungen der Aktivflächen führt (Kampker 2014, S. 73). Zudem ist eine beschädigungsfreie Verarbeitung des Separators während der Stapelbildung sicherzustellen.
- **Partikelfreiheit:** Eine Partikelbildung durch die Stapelbildung ist zu vermeiden. Dies bedeutet, dass Fertigungsverfahren, welche Partikel erzeugen, wie etwa trennende Fertigungsverfahren, beispielsweise Schneiden oder Perforieren, vermieden werden müssen, da Partikel innerhalb des Stapels zu Kurzschlüssen oder/und zu einer Verringerung der Leistungsfähigkeit führen können.
- **Positioniergenauigkeit:** Die Aktivflächen der Elektroden müssen sich überdecken. Dies bedeutet, dass die rechteckigen Aktivmaterialgrundflächen der Elektroden zueinander parallele Kanten und einen sich überdeckenden Mittelpunkt aufweisen müssen. Zudem ist eine flache Ablage der Materialbahnen auf den

Stapel anzustreben, sodass keine Aufwölbungen und damit keine Hohlräume der Einzellagen hervorgerufen werden (Holl & Schreiber et al. 2014, S. 70).

- Unabhängigkeit von Aktivmaterialparametern: Der Herstellungsprozess des Stapels sollte unabhängig von den mechanischen Materialparametern der Elektrodenbeschichtung sein. Dadurch kann die Anpassung an die jeweiligen zu verarbeitenden Materialien durch die Anpassung der Prozessparameter erfolgen.
- Taktzeit: Für eine wirtschaftliche Fertigung ist die Taktzeit der Stapelbildung von Bedeutung. Des Weiteren sind hierbei die Kosten für die Produktion des Stapels im Trockenraum in Betracht zu ziehen.
- Aktivmaterialausnutzung: Es bestehen im Stapeldesign kontinuierliche Materialbahnen. Die Aktivmaterialausnutzung der Elektroden ist bei der Stapelbildung dadurch sicherzustellen, dass die Aktivmaterialflächen der kontinuierlichen Materialbahnen vollumfänglich im Stapel verbaut werden.

## 5.2 Stapelbildungsablauf

Im Folgenden gilt es einen Stapelbildungsablauf für das in Kapitel 4.2.2 entwickelte Stapeldesign Zweifaches Z-Falten unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.1 diskutierten Anforderungen zu definieren. Die Ausgangsmaterialien des Zweifaches Z-Faltens sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Diese liegen in vier kontinuierlichen Materialbahncoils vor, sodass diese kontinuierlichen rollenförmigen Ausgangsmaterialbahnen in das gewünschte Stapeldesign, wie in Abbildung 5-3 zu sehen, zu überführen sind.

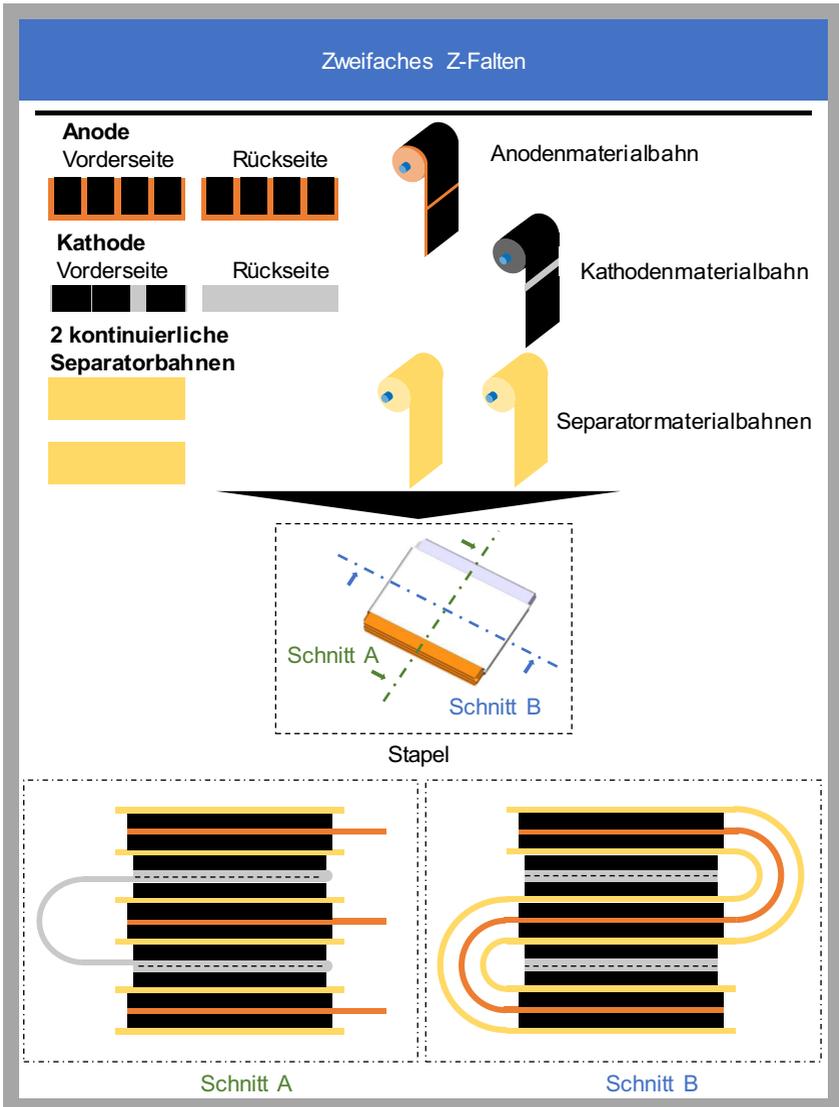


Abbildung 5-3 Ausgangsmaterialbahnen und Stapeldesign

Damit das Stapeldesign des Zweifachen Z-Faltens, siehe Abbildung 5-3, ohne Kollision der Elektrodenbahnen realisiert werden kann, sind die Anodenmaterialbahn und die

Kathodenmaterialbahn bei der Stapelbildung  $90^\circ$  zueinander versetzt anzuordnen. Dies ist in Abbildung 5-4 in der Ausgangsanordnung der Stapelbildung dargestellt. Daher sind die vier Materialbahnen in zwei Gruppen angeordnet. Hierbei bilden die beiden Separatormaterialbahnen und die Anodenmaterialbahn eine Einheit, die zweite Einheit ist die um  $90^\circ$  dazu versetzte Kathodenmaterialbahn. Dies ist in Abbildung 5-4 in den verschiedenen Ansichten (Draufsicht, Seitenansicht und Vorderansicht) der Ausgangsanordnung des Stapelbildungsablaufs ersichtlich.

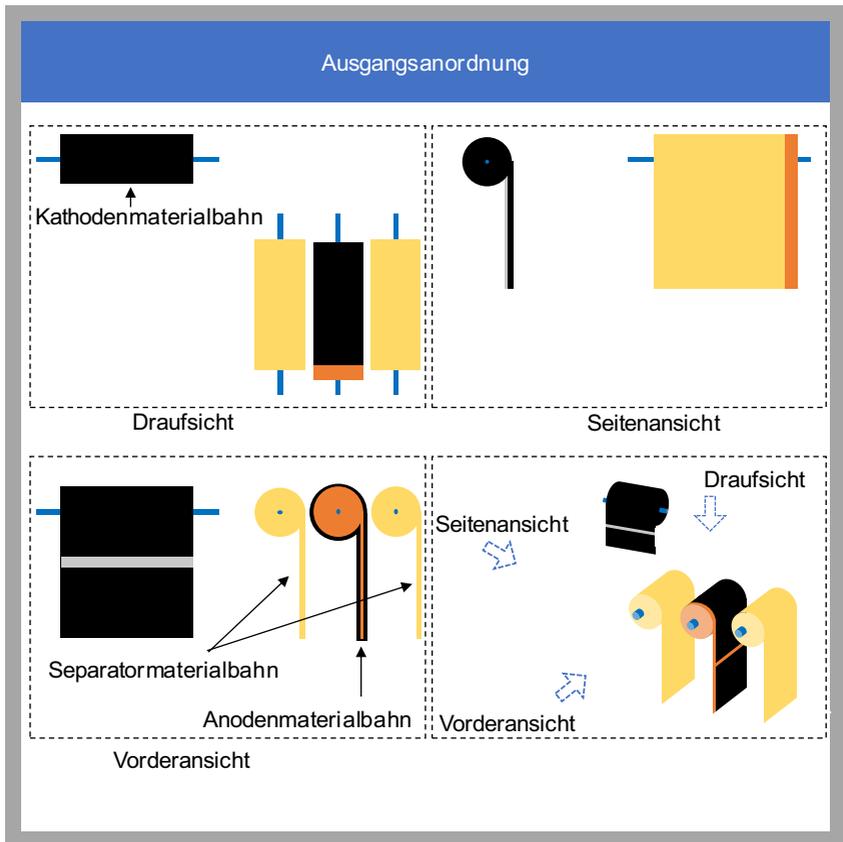


Abbildung 5-4 Ausgangsanordnung Stapelbildung

Zu Beginn des Stapelablaufs sind eine Separatormaterialbahn, eine Anodenmaterialbahn und eine weitere Separatormaterialbahn abzulegen. Daher wird zunächst die Einheit bestehend

aus den beiden Separatormaterialbahnen und der Anodenmaterialbahn von ihrer Ausgangsanordnung zu Anordnung 1 bewegt. Diese Anordnung 1 ist in Abbildung 5-5 abgebildet, hierbei ist die Ausgangsanordnung gestrichelt dargestellt. Dadurch ergibt sich, wie in der Schnittansicht in Abbildung 5-5 ersichtlich, der gewünschte Stapelaufbau Separator-Anode-Separator.

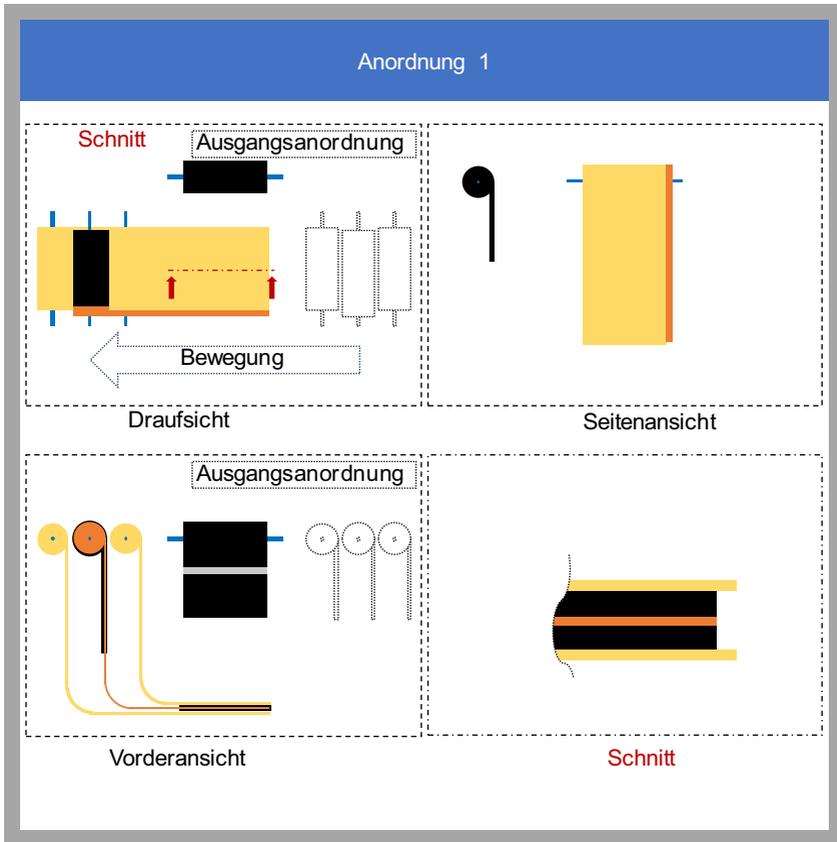


Abbildung 5-5 Anordnung 1 Stapelbildung

Für die Realisierung des Stapelaufbaus gilt es auf die in Anordnung 1 abgelegten Schichten eine Kathodenbahnlage abzulegen. Daher wird die Kathodenmaterialbahn von ihrer Position in Anordnung 1 in eine neue Position, Anordnung 2, bewegt, sodass eine Ablage des Kathodenmaterials auf den bereits abgelegten Bahnlagen erfolgt. Die

Positionen der Materialbahnen in Anordnung 2 sind in Abbildung 5-6 abgebildet. In der Draufsicht in Abbildung 5-6 ist ersichtlich, dass die Verfahrensbewegung der Kathodenmaterialbahn  $90^\circ$  versetzt zu der zuvor durchgeführten Verfahrensbewegung der Einheit Separator-, Anoden-, Separatormaterialbahn erfolgt.

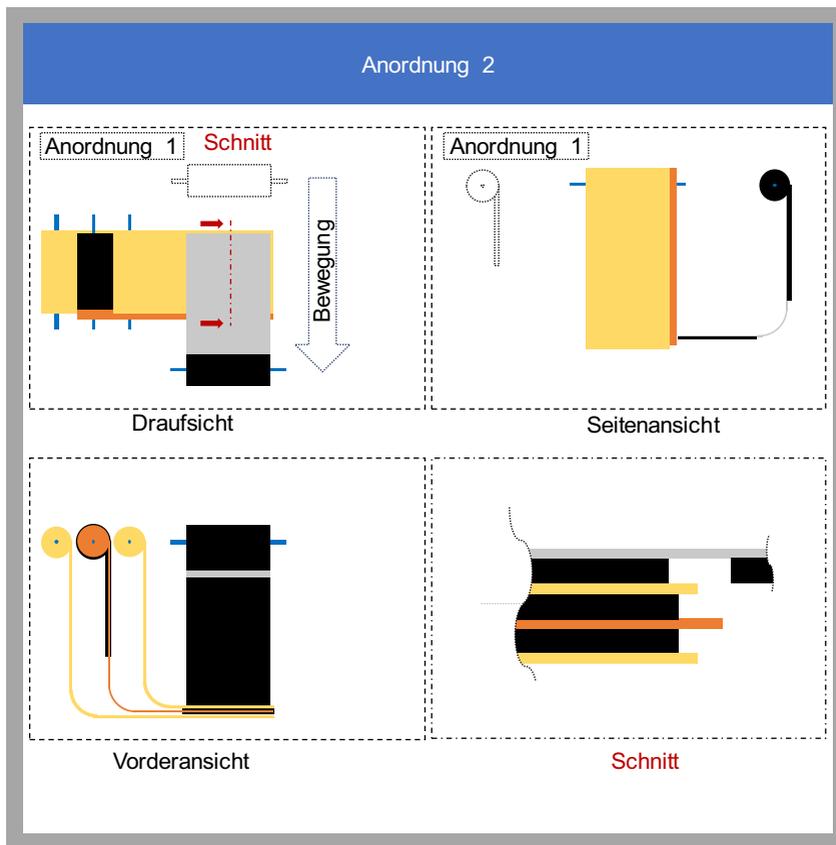


Abbildung 5-6 Anordnung 2 Stapelbildung

Zur Einhaltung des korrekten Stapelaufbaus ist eine Aktivmaterialkathodenschicht als oberste Lage auf dem Stapel anzuordnen, sodass in der Stapelbildungsabfolge die einseitig beschichtete Kathodenmaterialbahn auf dem Stapel abzulegen ist. Hierfür ist die Kathodenmaterialbahn von ihrer Position in Anordnung 2 in die Position von Anordnung 3 zu bewegen. Anordnung 3 ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Aufgrund der Ablage der

einseitig beschichteten Kathodenlage stellt sich der in Abbildung 5-7 in der Schnittansicht abgebildete, gewünschte Stapelaufbau ein. Im Stapelaufbau liegen die unbeschichteten Kathodenmaterialbahnseiten direkt aufeinander. Die Position der Kathodenmaterialbahn in Anordnung 3 entspricht ihrer Ausgangsanordnung zu Beginn der Stapelbildung.

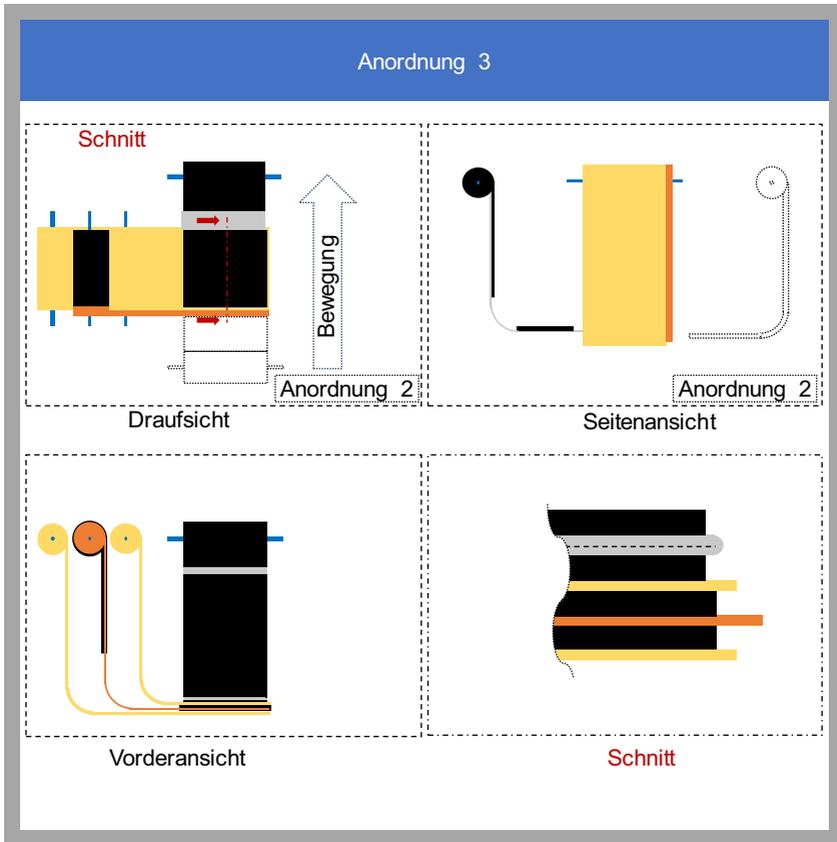


Abbildung 5-7 Anordnung 3 Stapelbildung

In der Stapelbildung ist als nächster Schritt die Ablage von Separator, Anode, Separator durchzuführen. Daher wird die Einheit dieser drei Materialbahnen über den Stapel bewegt, sodass eine Ablage der Materialbahnen auf dem Stapel erfolgt. Die neue Position, Anordnung 4, der beiden Separatormaterialbahnen und der Anodenmaterialbahn

ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Durch die Bewegung dieser drei Materialbahnen von Anordnung 3 zu Anordnung 4 befinden sich diese wieder in der Position, welche der Ausgangsanordnung zu Beginn der Stapelbildung entspricht. Daher befinden sich alle vier Materialbahnen in Anordnung 4 wieder in ihrer Ausgangsanordnung.

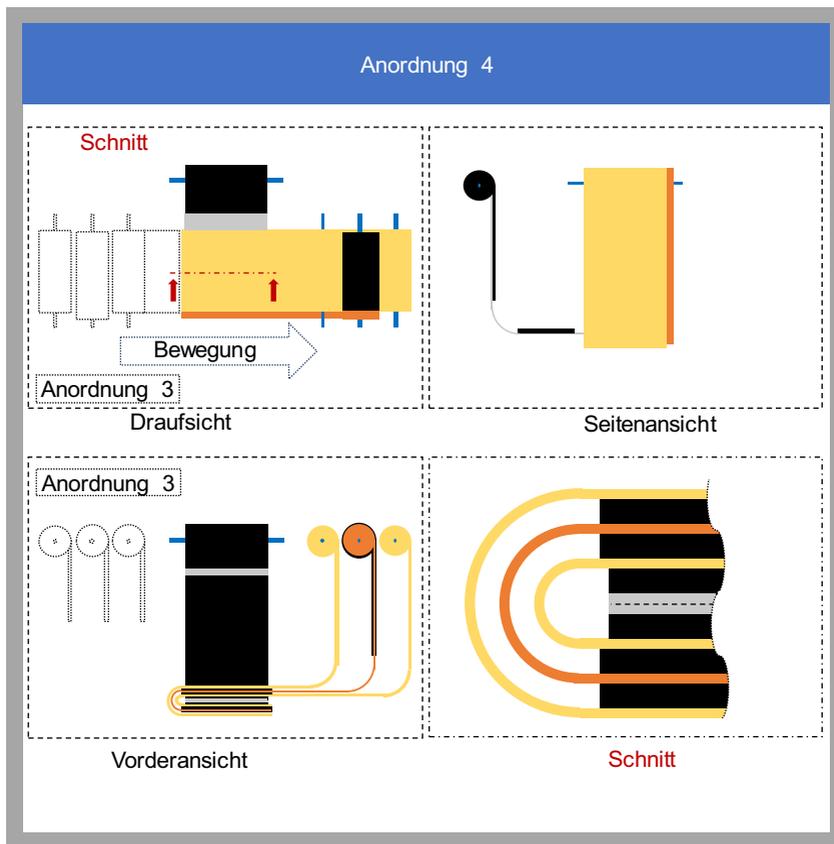


Abbildung 5-8 Anordnung 4 Stapelbildung

Die Bewegungen der Materialbahnen und damit die Ablage auf dem Stapel ist bis zur gewünschten Stapelhöhe entsprechend zu wiederholen. Daher folgt nach Anordnung 4 die Ablage der Kathode, sodass die Bewegungen der Kathodenmaterialbahn aus Anordnungen 2 und Anordnung 3 zu realisieren sind. Diese neuartige Abfolge in Kombination

mit den entsprechenden Beschichtungsmustern wurde in (Baumeister & Haag et al. 2013) patentiert.

Aus dem beschriebenen Stapelbildungsablauf ergibt sich die in Abbildung 5-9 dargestellte Ablagereihenfolge. Bei der Ablageabfolge ist darauf zu achten, dass die erste und die letzte Lage eines Stapels eine Separatorlage ist und die Elektrodenabfolge mit einer Anode beginnt und endet (Haag & Fleischer 2016).



Abbildung 5-9 Stapelbildungsablagereihenfolge

### 5.3 Qualitative Beschreibung der Wirkzusammenhänge

In Kapitel 5.2 wurde der Stapelbildungsablauf für den entwickelten Stapelaufbau definiert. Für die Erarbeitung und Umsetzung eines Konzepts für ein Verfahren zur Realisierung dieses Stapelbildungsablaufs sind zunächst die Wirkzusammenhänge von Stapelbildungsverfahren zu erarbeiten.

Hierfür werden zunächst die übergeordneten Parametergruppen der Stapelbildungsverfahren definiert. Nach dem Stand der Technik gängige Verfahren für die Verarbeitung von kontinuierlichen Materialbahnen, sowohl kontinuierlicher Separatorbahnen als auch Elektrodenbahnen, zu großformatigen Zellen sind das Flachwickeln (Kapitel 2.3.7) und das Z-Falten (Kapitel 2.3.4). Beiden Verfahren gemein ist die Materialbahnzuführung zum Stapel. Die Funktionsgruppen bei der Verarbeitung von bahnförmigen kontinuierlichen Materialien sind Materialbahnabwicklung, Bahnspannungserzeugung, Materialbahnpositionierung und Materialbahnförderung. Spezifisch sind die Ablage und die Fixierung auf dem Stapel sowie die Umlenkung bzw. Formung der Materialbahn in die gewünschte Kontur des jeweiligen Stapeldesigns. Eine 360°-Drehbewegung des Stapels zur Formung und Ablage der Materialbahn in die gewünschte Position, wie es beim Flachwickeln Anwendung findet, lässt sich für das in Kapitel 4 konzipierte Stapeldesign nicht übertragen, da die notwendige 180°-zickzackförmige Materialanordnung nicht durch eine 360°-Drehbewegung erzeugt werden kann. Basierend auf der zickzackförmigen Stapelbildung des Z-Faltens werden im Folgenden Zusammenhänge der wesentlichen Einflussfaktoren der Stapelbildung qualitativ erarbeitet. Hierfür wird die 5-M Methode nach Ishikawa angewendet. Dazu werden die signifikanten Einflüsse den fünf Kategorien Mensch, Methode, Milieu, Material und Maschine zugeordnet, siehe Abbildung 5-10.

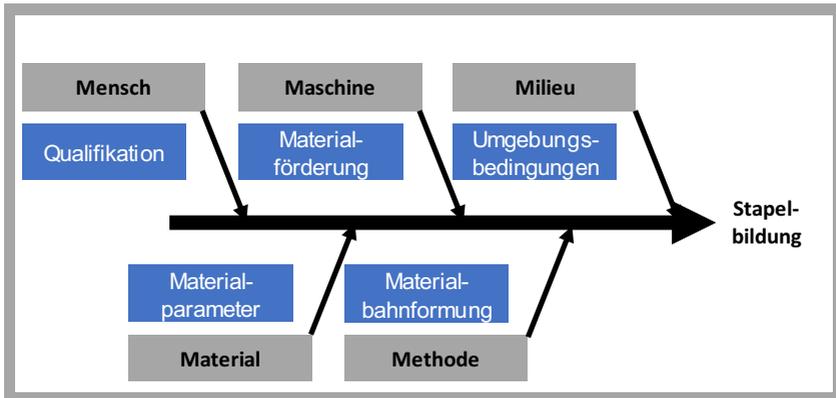


Abbildung 5-10 Einflüsse auf die Stapelbildung

Die Kategorie Milieu mit den Umgebungsbedingungen wie beispielsweise Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie die Kategorie Mensch, unter anderem mit der Mitarbeiterqualifikation, stehen für die Entwicklung des Stapelbildungsverfahrens nicht im Fokus, da diese Einflüsse unabhängig bzw. nicht spezifisch vom eigentlichen Verfahren sind. Daher leiten sich die in Abbildung 5-11 abgebildeten Bereiche Materialförderung, Materialbahnformung & Ablage sowie Materialparameter als die weiter zu untersuchenden Bereiche ab. Diese Bereiche beinhalten die wesentlichen mit der Materialbahn interagierenden Maschinenkomponenten zur Stapelbildung sowie das zu verarbeitende Material.



Abbildung 5-11 Übergeordnete Parametergruppen

Im Folgenden werden die einzelnen Gruppen näher diskutiert. Hierbei werden nur die für den vorliegenden Betrachtungsraum maßgeblichen Einflussgruppen der jeweiligen Bereiche beleuchtet.

## Stapelbildung

Die in diesem Zusammenhang relevanten Aspekte der Stapelbildung sind die in Kapitel 5.1 definierten Gruppen. Diese sind in Abbildung 5-12 dargestellt.

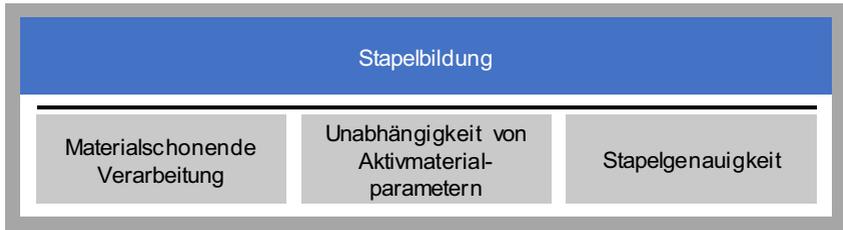


Abbildung 5-12 Gruppen der Stapelbildung

## Materialbahnförderung

Die Materialförderung wird ihrerseits in weitere Komponentengruppen unterteilt, welche in Abbildung 5-13 ersichtlich sind. Im Folgenden werden die Funktionen der jeweiligen Gruppen definiert.

- Die Materialbahnableitung sorgt für die Abwicklung der benötigten Materialbahnlänge durch eine Rotation des Materialcoils.
- Die Bahnspannungserzeugung dient zum einen der Erzeugung einer definierten Bahnspannung, zum anderen der Aufrechterhaltung einer konstanten Bahnspannung.
- Die Materialbahnumlenkung dient der Führung der Materialbahn durch Stützung und Umlenkung, ausgehend von der Materialbahnableitung hin zum Formungs- und Ablegeprozess.
- Die Materialbahnpositionierung bringt die Materialbahn in die benötigte Position und Orientierung.

Der Materialbahnvorschub, der ursächlich für den Bedarf der Materialbahnableitung ist, wird dem Bereich der Materialbahnablage zugeordnet, da dieser teilweise Bestandteil des Formungs- und Ablegeschrittes ist.



*Abbildung 5-13 Komponentengruppen der Materialförderung*

### **Materialbahnablage**

Die Materialbahnablage für den definierten Anwendungsfall wird in vier Gruppen unterteilt, siehe hierzu Abbildung 5-14 :

- Die Materialbahnklemmung sorgt dafür, dass die Materialbahn fixiert ist und somit der Formungsprozess durchgeführt werden kann.
- Die Stapelklemmung klemmt den Stapel entsprechend, damit der bereits gebildete (Teil-)Stapel in der definierten Position gehalten wird.
- Der Materialbahnvorschub sorgt für ein Ziehen der Materialbahn und bedingt dadurch die Materialbahnabwicklung.
- Die Materialbahnformung erzeugt die gewünschte Kontur der Materialbahn und legt diese entsprechend auf den (Teil-)Stapel ab, sodass dadurch das gewünschte Stapeldesign entsteht.



Abbildung 5-14 Materialbahnablage

### Matereieigenschaften

Generell können nach (Hornbogen & Eggeler et al. 2017) die Eigenschaften von Werkstoffen in mechanische, physikalische, chemische und tribologische Eigenschaften unterteilt werden. Im vorliegenden Anwendungsfall werden die Zusammenhänge der mechanischen und der tribologischen Eigenschaften mit den anderen übergeordneten Gruppen bei der Stapelbildung betrachtet. Dies umfasst die Eigenschaften der beiden Elektrodenmaterialien, sowohl Trägerfolie als auch Aktivmaterial, und des Separators.

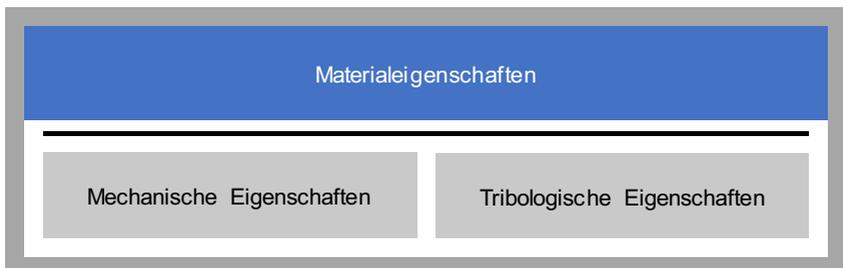


Abbildung 5-15 Betrachtete Materialeigenschaften

Die qualitativen direkten Zusammenhänge der vier definierten Bereiche sind in Abbildung 5-16 dargestellt. Hieraus leitet sich der Matrix-Vergleich der Zusammenhänge der Bereiche ab. Dieser ist in Abbildung 5-17 dargestellt. Aus dem Vergleich ist ersichtlich,

dass die Materialbahnablage die meisten direkten Zusammenhänge aufweist. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Stapelbildung aufgrund der hohen Dynamik in der Materialentwicklung möglichst unabhängig von den Materialeigenschaften sein sollte und daher die Materialeigenschaften nur einen minimalen Einfluss auf den Produktionsprozess der Stapelbildung haben sollten, hat die Funktionsgruppe der Materialbahnablage einen maßgeblichen Einfluss auf das Verfahren zur Stapelbildung.

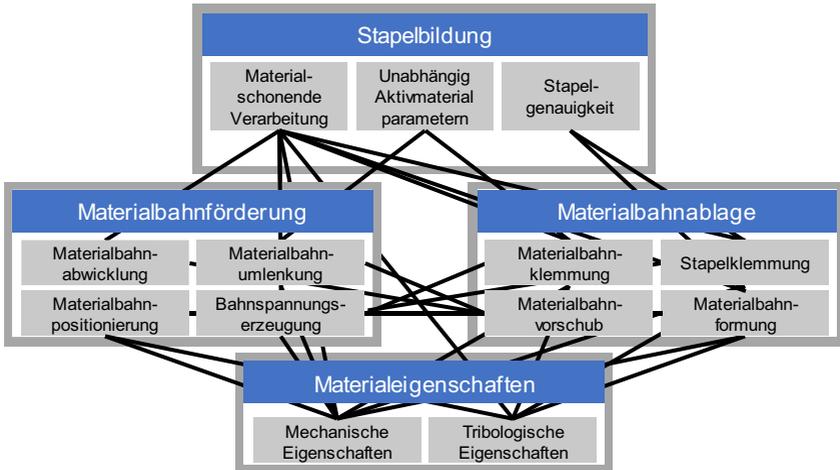


Abbildung 5-16 Qualitative Zusammenhänge der Funktionsgruppen

|                       | Stapelbildung | Materialbahn-<br>förderung | Materialbahnablage | Material-<br>eigenschaften |
|-----------------------|---------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| Stapelbildung         |               | 4                          | 6                  | 2                          |
| Materialbahnförderung | 4             |                            | 6                  | 4                          |
| Materialbahnablage    | 6             | 6                          |                    | 6                          |
| Materialeigenschaften | 2             | 4                          | 6                  |                            |
| Summe                 | 12            | 14                         | 18                 | 12                         |

Abbildung 5-17 Matrix-Vergleich der Zusammenhänge der Funktionsgruppen

Innerhalb der Funktionsgruppe der Materialbahnablage ist die Materialbahnformung das zentrale Element. Die Materialbahnformung ist die Herstellung des Bereichs des Stapeldesigns, in welchem die 180°-Richtungsumkehr der Materialbahnen realisiert wird. Daher hat die Materialbahnformung die Aufgabe, die Verwendung von kontinuierlichen Materialbahnen zu ermöglichen, sodass die Aktivmaterialflächen ausschließlich eben im Stapel angeordnet sind und die Formungsbereiche ohne Aktivmaterial ausgeführt sind.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die Funktionsbereiche der Materialbahnförderung, Materialbahnablage und Materialeigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf die Stapelbildung haben. Die Funktionsgruppe der Materialbahnablage ist hierbei von signifikanter Rolle. Innerhalb dieser ist die Materialbahnformung mit der Realisierung der 180°-Richtungsumkehr der Haupteinflussfaktor. Aufgrund dieses zentralen Einflusses auf die Eigenschaften der Stapelbildung wird im Folgenden die 180°-Richtungsumkehr tiefergehend betrachtet.

## 5.4 Analyse Verfahren zur 180°-Richtungsumkehr

Der maßgebliche Prozessschritt der Stapelbildung des konzipierten Stapelaufbaus des Zweifachen Z-Faltens ist die 180°-Richtungsumkehr der Materialbahn. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Formung und präzise Ablage der Elektrodenmaterialbahnen. Im Unterschied zum klassischen Z-Falten (siehe Kapitel 2.3.4) muss beim vorliegenden Anwendungsfall nicht nur eine 180°-Richtungsumkehr der Elektrodenmaterialbahn erzeugt werden, sondern es besteht zusätzlich die Anforderung, die Elektrodenmaterialbahnen so abzulegen, dass die Beschichtungsmuster mit der notwendigen Genauigkeit entsprechend positioniert sind (siehe Abbildung 5-18). Dies bedeutet, dass die Beschichtungskanten, Beginn und Ende der Beschichtung, überdeckend im Stapel angeordnet sind, siehe hierzu Abbildung 5-18 rechts gestrichelte Linie. In Abbildung 5-18 ist links Anordnung 3 und rechts Anordnung 4 des in Kapitel 5.2 definierten Stapelbildungsablaufs abgebildet. Die 180°-Richtungsumkehr erfolgt im Übergang von Anordnung 3 zu Anordnung 4, also dem Bewegen der beiden Separatormaterialbahnen und der Anodenmaterialbahn. Beim klassischen Z-Falten ist die Positionierung der Beschichtungsmuster aufgrund der kontinuierlichen Beschichtung der Elektroden während der Stapelbildung nicht notwendig. Beim Z-Falten mit Einzelblättern entfällt diese Anforderung ebenfalls, da bei diesem Stapeldesign nur der Separator kontinuierlich ausgeführt ist und Elektroden diskontinuierlich auf den Stapel abgelegt werden.

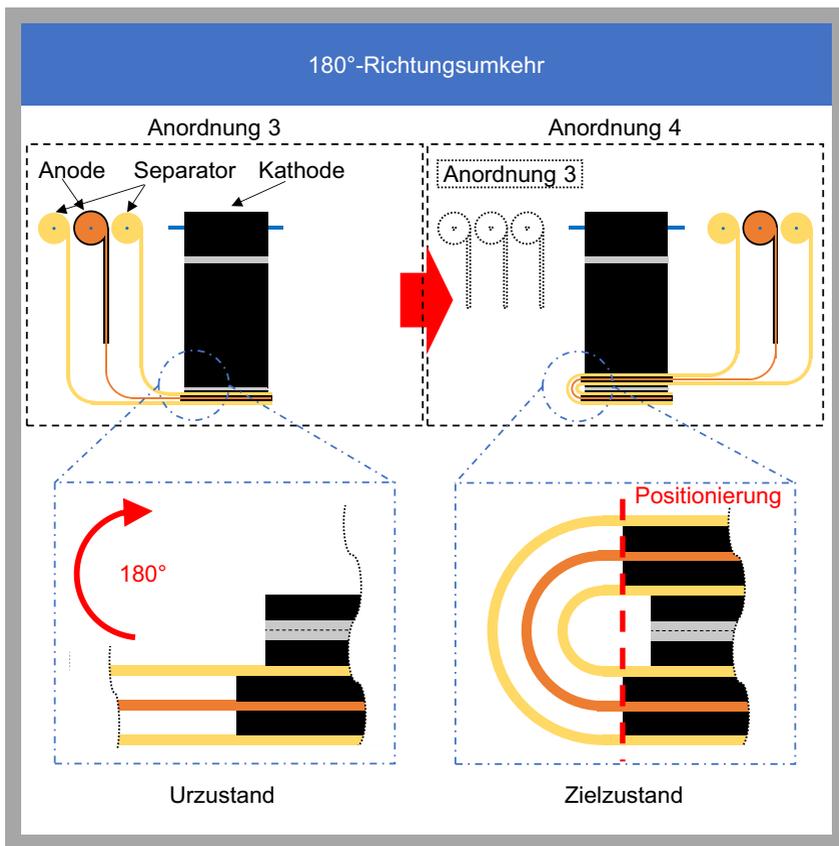


Abbildung 5-18 Ur- und Zielzustand 180°-Richtungsumkehr

Die allgemeinen Kriterien der Stapelbildung, Kapitel 5.1, werden zunächst auf die Richtungsumkehr abgeleitet und konkretisiert. Anschließend werden verschiedene Anwendungsfälle, in welchen eine Richtungsumkehr von Materialien erzeugt wird, vorgestellt. Diese werden analysiert und auf ihre Übertragbarkeit auf den vorliegenden Anwendungsfall überprüft.

### 5.4.1 Kriterien der 180°-Richtungsumkehr

Die bereits definierten Kriterien der Stapelbildung werden nachfolgend auf den Prozessschritt der Richtungsumkehr, welcher auch die Ablage auf den bereits gebildeten (Teil-)Stapel beinhaltet, übertragen.

Zur Realisierung einer materialschonenden Verarbeitung für die Erzeugung der Richtungsumkehr gilt es daher, die Werkzeugkomponenten und die daraus resultierende Materialbahnbewegung so zu gestalten, dass:

- keine Gleitbewegung mit Reibung zwischen den Werkzeugkomponenten und der Materialbewegung notwendig ist.
- keine scharfen Kanten in die Beschichtung eingedrückt werden, sodass es nicht zu Materialausbrüchen kommen kann.
- die Mindestbiegeradien der Materialien nicht unterschritten werden. Insbesondere eine Biegung der beschichteten Flächen gilt es möglichst zu vermeiden.
- keine (vorbereitenden) Prozessschritte mit Fertigungsverfahren, welche eine Erzeugung von Partikeln verursachen, Anwendung finden.
- die Materialbahnverläufe tangentielle Übergänge zwischen Bereichen, in welchen die Materialbahn eben angeordnet ist, und Bereichen, in welchen die Materialbahn eine Richtungsänderung erfährt, aufweisen.

Da die Genauigkeit des Stapels an der Lage der beschichteten Elektrodenflächen zueinander bestimmt wird und die Position dieser durch den Richtungsumkehrschritt erzeugt wird, muss der Prozess eine präzise Ablage der Beschichtungskanten ermöglichen. Zudem muss diese Ablage so erfolgen, dass keine Aufwölbungen und Hohlräume der Materialbahnen entstehen, sodass eine flache Ablage der Materialbahnen aufeinander gewährleistet wird.

Der Richtungsumkehrprozess sollte idealerweise unabhängig von der Zusammensetzung der beschichteten Bereiche der Elektroden sein, daher gilt es darauf zu achten, dass deren Einfluss auf die Gestaltung der Abläufe und Komponenten minimal ist.

Zur Vermeidung der Entstehung von Partikeln ist auf trennende Verfahren zu verzichten.

Darüber hinaus bestehen für die Herstellung der 180°-Richtungsumkehr der Materialbahnen folgende Anforderungen an den Prozess:

- Die Elektroden- und Separatormaterialbahnen liegen als kontinuierliche Bahnen vor. Diese Materialbahnen sind als kontinuierliche Bahnen sowohl bei der Herstellung als auch im Stapel beizubehalten. Hieraus leiten sich die Anforderungen ab, dass der Prozess kontinuierliche Bahnen verarbeiten und diese direkt auf den Stapel ablegen können muss, da ansonsten kein kontinuierliches Stapeldesign erzeugt werden kann.
- Die Herstellung darf keine Veränderung der Stoffeigenschaften der Materialbahnen hervorrufen.
- Die geometrischen Abmessungen des Bahnmaterials sind beizubehalten. Dies bedeutet, dass beispielsweise keine Veränderung der Materialbahndicke vorgenommen werden darf.
- Der Einsatz von Hilfsstoffen, wie Flüssigkeiten oder Gase, ist bei der Materialformung zu vermeiden, da dies Verunreinigungen in der Zelle verursachen könnte.
- Für die Werkzeugkomponenten, die zur Bildung der Materialformung Verwendung finden sollen, ist die Zugänglichkeit eingeschränkt. Da der bereits gebildete (Teil-)Stapel nicht verschoben werden darf, kann der schraffierte Bereich in Abbildung 5-19 nicht als Arbeitsraum zur Formbildung genutzt werden. In Abbildung 5-19 ist der Ausgangs- und Endzustand der Materialbahnbewegung zur 180°-Richtungsumkehr exemplarisch anhand eines Materialbahncoils und eines gebildeten (Teil-)Stapels dargestellt. Aus Abbildung 5-19 ist zudem ersichtlich, dass die Ablage der Materialbahn direkt auf den Stapel erfolgen muss.

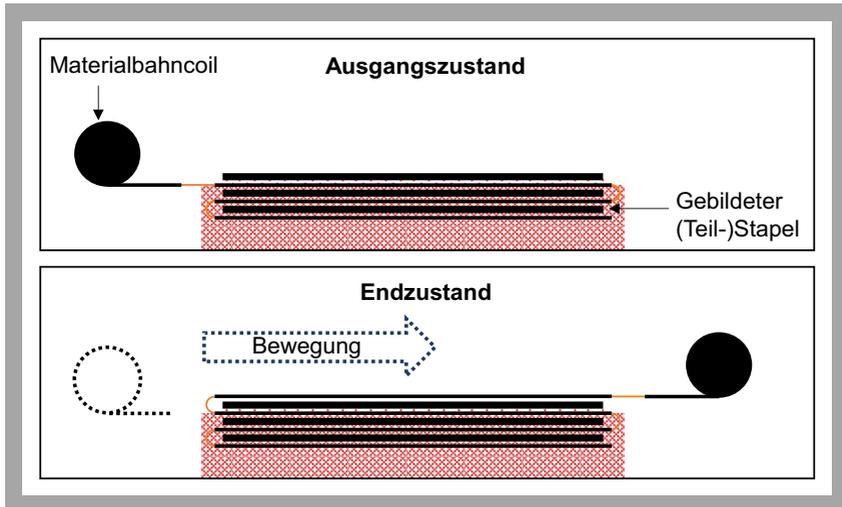


Abbildung 5-19 Geometrische Randbedingungen der Formung

Bei der hervorzurufenden Formung steht demnach im Vordergrund, dass eine definierte Positionierung der Materialbahn unter Beibehaltung der Materialbahndicke und deren Eigenschaften erzielt wird. Von untergeordnetem Interesse ist daher, inwieweit die Verformung elastische und plastische Anteile enthält, sofern die zuvor genannten Bedingungen erfüllt sind. Sind elastische Verformungen in der Materialbahn bei Sollposition, gilt es sicherzustellen, dass die Materialbahn entsprechend in dieser Position gehalten wird. Dies gilt sowohl während des Stapelprozesses als auch für den fertig gebildeten Stapel, beispielsweise kann der Stapel direkt nach der Stapelbildung mit Klebeband fixiert werden (Techel 2011, S. 39). Aufgrund der geringen Eigensteifigkeit der Elektrodenmaterialbahnen und der Separatormaterialbahn muss die Materialbahn bei der Zuführung und beim Formungsvorgang selbst entsprechend in die gewünschte Position gebracht und dort gehalten werden. Diesen Aspekt gilt es bei der Betrachtung der Verfahren zur Formung zu berücksichtigen.

Für den beschriebenen Anwendungsfall mit den dazugehörigen Kriterien und Randbedingungen werden daher nachfolgend existierende Verfahren zur Materialformung diskutiert.

## 5.5 Materialformungen des Separators beim Z-Falten

Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten der Materialformung aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen diskutiert und auf ihre Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall analysiert. Betrachtete Anwendungsbereiche sind hierbei die Blechverarbeitung, die Papierindustrie sowie die Batteriezellstapelbildung. Zunächst wird die Materialformung des Separators beim Z-Falten in der Batteriezellstapelbildung beleuchtet. Hierbei wird die kontinuierliche Separatorbahn um 180° geformt. Dieser Prozess wird nachfolgend diskutiert.

### Verfahrensablauf

Für das sogenannte Z-Falten mit Einzelblättern wird eine kontinuierliche Separatormaterialbahn verwendet, welche zickzackförmig gefaltet wird. Die Elektroden sind jedoch nicht kontinuierlich ausgeführt, sondern werden als Einzelblätter in den Stapel eingebracht. Der Verfahrensablauf des Separatorfaltens wird nach (Kurfer & Westermeier et al. 2012b) und (Schmitt 2015, S. 165) vorgestellt. Zu Beginn wird der Separator auf dem Stapeltisch fixiert. Der Stapeltisch bewegt sich abwechselnd zu den Ablagepositionen der Kathode bzw. Anode. Dort werden die entsprechenden Einzelelektrodenblätter mit einer Handhabungsvorrichtung auf den Stapeltisch abgelegt. Die Materialbahnförderung ist örtlich fixiert und bewegt sich nicht mit dem Stapeltisch mit. Wird ein Elektrodenblatt durch einen Greifer auf den Separator abgelegt, wird dieses mit einem Niederhalter am Rand auf dem Stapel geklemmt. Dieser Niederhalter bewegt sich mit dem Stapeltisch mit, sodass der Separator sich aufgrund der Bewegung des Stapeltisches an den Niederhalter anlegt. Durch den Ablageprozess des nächsten Elektrodenblattes wird der Stapel durch den Elektrodengreifer geklemmt, sodass der mit dem Separator umschlungene Niederhalter aus dem Stapel entfernt werden kann und ein weiterer Niederhalter auf das Elektrodenblatt zur Fixierung positioniert werden kann, siehe Abbildung 5-20.

Es existieren mehrere Verfahrensvarianten des Z-Faltens mit Einzelelektroden. Eine Möglichkeit ist, dass anstatt der Bewegung des Stapeltisches die Materialbahnförderung des Separators über den Stapeltisch bewegt wird und dieser dafür örtlich fixiert ist. Die Grundcharakteristika der Verfahrensvarianten sind jedoch identisch.

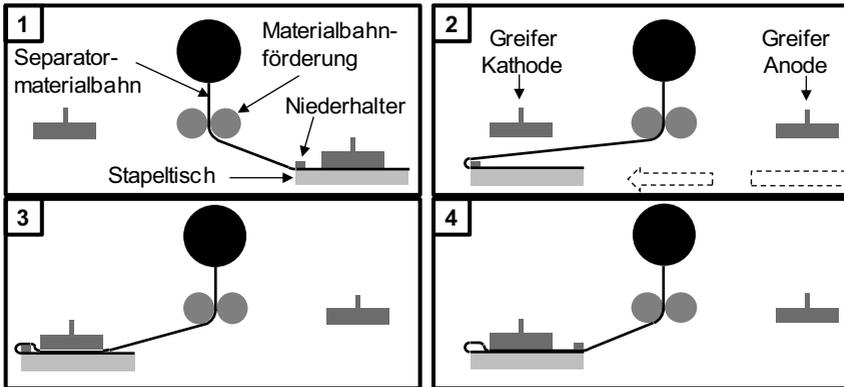


Abbildung 5-20 Z-Falten nach (Kurfer & Westermeier et al. 2012b)

Die für die elektrochemische Performance der späteren Zelle exakte Positionierung der Einzelelektroden zueinander wird nicht durch den Faltvorgang realisiert, sondern mit zusätzlichen Handhabungsvorrichtungen, welche über die erforderlichen Genauigkeit verfügen (Schröder & Aydemir et al. 2016, S. 645; Schmitt 2015, S. 179; Schmitt & Ratz 2014, S. 315; Kurfer & Westermeier et al. 2012b, S.3).

### Übertragbarkeit

Aus dem beschriebenen Prozessablauf geht hervor, dass der Separator den Niederhalter umschlingt und durch den Elektrodengreifer fixiert wird, während der Niederhalter aus dem Stapel entfernt wird. Da die Niederhalterdicke größer ist als der erforderliche Abstand der beiden Schenkel des 180°-Soll-Materialbahnverlaufs zueinander, ist die abgelegte Materialbahnlänge größer als die eigentlich notwendige Materialbahnlänge. Aufgrund dessen müsste die Materialbahn nachträglich in einem zusätzlichen Schritt komprimiert werden, nachdem der Niederhalter aus dem Stapel entfernt wurde, andernfalls sind die Schenkel der Materialbahnformung nicht horizontal. Dies würde bedeuten, dass in diesem Bereich, welcher der Materialformung zugerechnet werden müsste, inaktive Materialien sein sollten, da ansonsten Inhomogenitäten in der Elektrodenfläche hervorgerufen werden könnten. Durch einen zusätzlichen Komprimierschritt würden zudem Materialbeanspruchungen hervorgerufen, welche einer materialschonenden Verarbeitung entgegenstehen würden. Daher müsste bei einer Übertragung des Prozessablaufes für die Faltung von kontinuierlichen Elektrodenbahnen mit inter-

mittierter Beschichtung der nichtbeschichtete Bereich aufgrund der großen Materialumformungszone, welche bis zur einer Parallelität der abzulegenden Materialbahnen reichen würde, größer ausgeführt werden.

Nachfolgend wird eine kontinuierliche Verfahrensvariante für das Z-Falten mit Einzelblättern nach (Glodde & Aydemir et al. 2016) vorgestellt.

### **Verfahrensablauf**

Der Ansatz ist, die zuvor beschriebenen Zu- und Rückstellbewegungen bei der Separatorfaltung durch eine kontinuierliche Verfahrensführung zu ersetzen (Glodde & Aydemir et al. 2016, S. 585). Hierfür werden zwei umlaufende Transportsysteme verwendet, welche einem Bahnplanungsalgorithmus folgen, damit eine definierte Faltung des Separators durchgeführt werden kann (Glodde & Aydemir et al. 2016, S. 586). Der Separator wird mittels Greifern, die an den umlaufenden Transportsystemen befestigt sind, gefördert und gefaltet (Schröder & Glodde et al. 2015, S. 24). Die linear umlaufenden Transportsysteme werden mittels Linearmotoren realisiert (Schröder & Glodde et al. 2015, S. 25). Die Separatorfaltung ist mit der Elektrodenzuführung und Ablage in den Separator synchronisiert, sodass ein Zellstapel aufgebaut werden kann (Glodde & Aydemir et al. 2016, S. 586). Der Verfahrensablauf ist in Abbildung 5-21 dargestellt.

### **Übertragbarkeit**

Analog zu dem zuvor beschriebenen Prozessablauf des Z-Faltens mit Niederhalter wird bei diesem Prozessablauf ebenfalls die Werkzeugkomponente umschlungen, sodass dieselben, bereits zuvor diskutierten Nachteile entstehen.

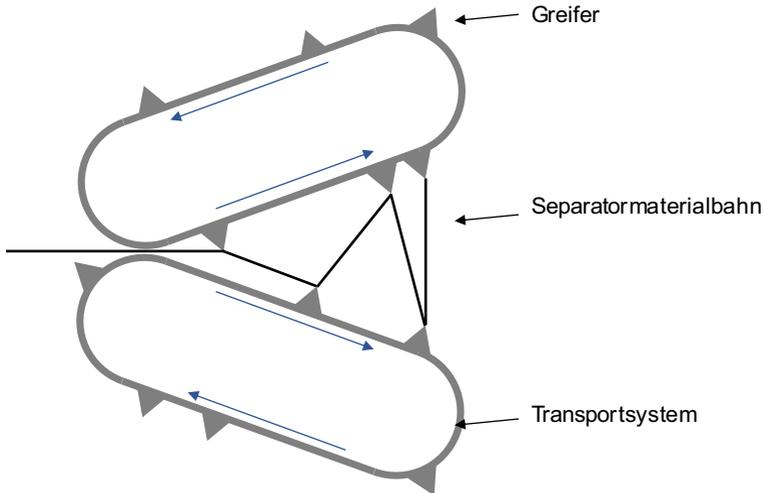


Abbildung 5-21 Separatorfaltung nach (Schröder & Glodde et al. 2015, S. 25)

## 5.6 Analogiebildung aus Anwendungsfällen der Blechverarbeitung

Ein weiterer Anwendungsbereich, in welchem Materialbahnumformungen realisiert werden, ist die Blechverarbeitung, für den vorliegenden Anwendungsfall sind insbesondere das Biegeumformen und das Streckziehen (DIN 8585-4:2003-09) von Interesse und werden daher nachfolgend diskutiert. Hierzu werden die Verfahrensabläufe vorgestellt und ihre Übertragbarkeit auf den vorliegenden Anwendungsfall beleuchtet.

Das Biegeumformen kann gemäß (DIN 8586:2003-09) in zwei Untergruppen unterteilt werden, welche sich entsprechend in weitere Verfahren unterteilen lassen, siehe Abbildung 5-22.

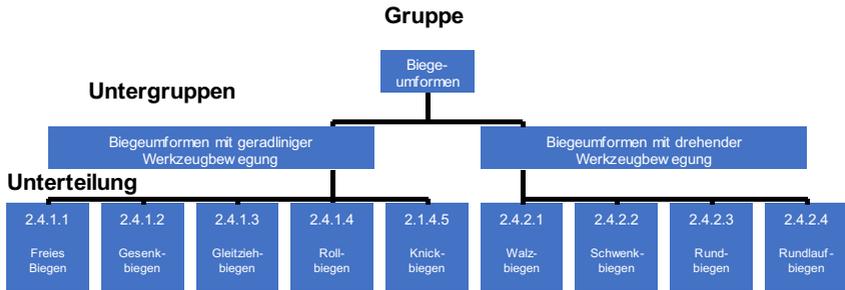


Abbildung 5-22 Übersicht der Verfahren des Biegeumformens (DIN 8586:2003-09, S. 11)

Das Gleitziehbiegen wird nicht näher verfolgt, da die mit diesem Verfahren herstellbaren Formen nicht den geforderten Formungen der Materialbahn der Stapelbildung entsprechen und diese nicht herstellbar sind (DIN 8586:2003-09, S. 6). Das Rollbiegen wird aufgrund der benötigten Bauraumzugänglichkeit und der Tatsache, dass eine kontinuierliche Materialbahn verarbeitet werden muss, ausgeschlossen (Hoffmann & Neugebauer et al. 2012, S. 574). Knickbiegen wird für den vorliegenden Anwendungsfall nicht tiefergehend betrachtet, da der Umformvorgang durch Ausknicken des Werkstücks erfolgt (DIN 8586:2003-09, S. 6), sodass die Materialparameter hier einen maßgeblichen Einfluss auf die sich einstellende Form haben. Walzbiegen wird aufgrund des Verfahrensablaufes, bei welchem das Werkstück durch sich drehende Walzen hindurchgeschoben wird, nicht weiterverfolgt (Doege & Behrens 2010, S. 380). Beim Rundbiegen wird das umzuformende Blech durch eine Klemmvorrichtung auf eine Biegerolle gespannt, welche durch eine Drehung die Umformung hervorruft und zudem für ein Nachrutschen des Materials sorgt (Fritz & Schulze 2015, S. 488). Aufgrund dieser notwendigen Bewegung des Werkstücks beim Rundbiegen wird das Verfahren nicht näher betrachtet. Das Rundlaufbiegen wird ebenfalls aufgrund der Materialförderung ausgeschlossen. Im Folgenden werden das Freie Biegen, das Gesenkbiegen und das Schwenkbiegen diskutiert.

### 5.6.1 Freies Biegen

#### Verfahrensablauf

Beim Freien Biegen dienen die Werkzeuge lediglich der Kraft- bzw. Momentenübertragung auf das Werkstück. Die Biegelinie in der Umformzone bildet sich entsprechend

frei aus. Die erzeugte Form des Werkstücks hängt demnach nicht primär von der Werkzeugform ab, sondern von der Positionierung des Stempels zur Werkzeugaufgabe sowie den Materialparametern des Werkstücks, wie der Fließkurve und der Ausgangsmaterialdicke (Hofmann, S. 584). Daher herrscht beim Freien Biegen eine geringe Biege-  
winkelgenauigkeit. Das Sichern des Werkstücks kann, wie in Abbildung 5-23 verdeutlicht, durch ein Klemmen zwischen einem Niederhalter und einer Werkstückauflage realisiert werden. Die Bewegung des Werkstücks wird durch die lineare Bewegung des Stempels hervorgerufen.

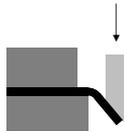


Abbildung 5-23 Freies Biegen nach (DIN 8586:2003-09, S. 3)

## Übertragbarkeit

Da die Materialparameter einen großen Einfluss auf die sich einstellende Form des Werkstücks haben, ist eine unmittelbare Übertragbarkeit nicht gegeben. Beim Bewegen des Werkstücks tritt eine Reibbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück auf, welche bei der vorliegenden Anwendung zu vermeiden ist. Zudem müsste der Verfahrensablauf für die Verarbeitung von kontinuierlichen Materialbahnen mit geringer Eigensteifigkeit hinsichtlich der Materialförderung, -fixierung und -bewegung angepasst werden.

## 5.6.2 Gesenkbiegen

### Verfahrensablauf

Das Gesenkbiegen kann den werkzeuggebundenen Umformverfahren zugeteilt werden. Bei diesen Verfahren nimmt das Werkstück die Form des Werkzeuges, bis auf elastische Rückfederungsanteile, an (Hoffmann & Neugebauer et al. 2012, S. 575). Beim Gesenkbiegen erfolgt die Formung zwischen dem Stempel und dem Biegegesenk, bis das Werkstück am Gesenk anliegt. Die Vorgänge können in zwei Schritte unterteilt werden, das Freibiegen und das Nachformen. Beim Freibiegen wird der Stempel auf das Werkstück angesetzt und endet damit, dass sich die Schenkel des Werkstücks an die Gesenkwände anlegen. Die Anpassung an die Werkzeugform erfolgt beim Nachformen. Rückfederungseffekte können hierbei weitestgehend durch hohe

Kräfte beim Nachformen vermieden werden (Doege & Behrens 2010, S. 377). Das Sichern des Werkstücks erfolgt beim Gesenkbiegen zwischen dem Werkstückhalter und dem Biegegesenk. Das Bewegen wird durch die Bewegung des Stempels erwirkt, siehe Abbildung 5-24.

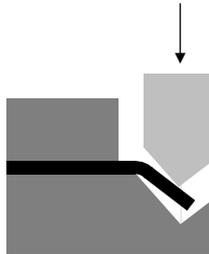


Abbildung 5-24 Gesenkbiegen nach (DIN 8586:2003-09, S. 4)

### Übertragbarkeit

Eine direkte Übertragbarkeit ist aufgrund der kontinuierlichen Materialbahn mit geringer Eigensteifigkeit nicht gegeben, sodass eine Anpassung der Werkstückklemmung und der Führung vorgenommen werden müsste. Nachteilig ist zudem die Gleitbewegung zwischen Werkstück und Stempel bei der Formung.

### 5.6.3 Schwenkbiegen

#### Verfahrensablauf

Das Schwenkbiegen ist ein Biegeumformverfahren mit drehender Werkzeugbewegung. Hierbei wird das Werkstück einseitig eingespannt und durch eine Schwenkbewegung der Biegewange geformt (Fritz & Schulze 2015, S. 487), siehe Abbildung 5-25. Beim Freien Biegen und Gesenkbiegen wird das Werkstück bei Verfahrensvarianten beidseitig eingespannt, dies ist beim Schwenkbiegen nicht der Fall. Im Gegensatz zu den beiden bisher vorgestellten Biegeumformverfahren erfolgt beim Schwenkbiegen keine Relativbewegung von Werkzeug zu Werkstück, sondern es tritt eine Abrollbewegung der Biegewange auf dem Werkstück ein (Hoffmann & Neugebauer et al. 2012, S. 591). Hierbei wandert der Berührungspunkt von Werkstück und Biegewange von der äußeren Kante zur inneren Kante der Biegewange. Das Sichern des Werkstücks wird durch die

beiden Klemmwangen realisiert, das Bewegen des Werkstücks erfolgt aufgrund der Bewegung der Biegewange.

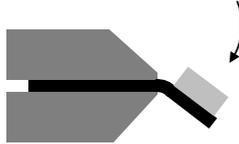


Abbildung 5-25 Schwenkbiegen nach (DIN 8586:2003-09, S. 9)

### Übertragbarkeit

Aufgrund der Anforderung der vorliegenden Stapelbildung, dass kontinuierliche Materialbahnen mit geringer Eigensteifigkeit zu verarbeiten sind, ist das Schwenkbiegen in seiner ursprünglichen Form nicht unmittelbar übertragbar. Die Merkmale der einseitigen Werkstückeinspannung sowie die Abrollbewegung anstatt einer Gleitbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück sind potenziell übertragbar.

## 5.6.4 Streckziehen

### Verfahrensablauf

Das Streckziehen ist der Untergruppe Tiefen der Gruppe Zugumformen zuzuordnen, daher erfolgt die Umformung überwiegend aufgrund der Zugbeanspruchung. Beim Zugumformen tritt eine Oberflächenvergrößerung bei einer Wanddickenabnahme auf (Fritz & Schulze 2015, S. 481). Tiefen kann nach (DIN 8585-4:2003-09) unterteilt werden in Tiefen mit starren Werkzeugen und Tiefen mit nachgiebigen Werkzeugen. Das Streckziehen ist ein Verfahren der Kategorie Tiefen mit starren Werkzeugen, welches beispielsweise im Karosseriebau für Busse und LKW sowie für großflächige Blechformteile in der Luftfahrtindustrie Verwendung findet (Fritz & Schulze 2015, S. 483). Hierbei wird das Werkstück fest eingespannt. Die Zugspannungen werden über den Stempel aufgebracht, durch eine feste Einspannung mit Spannzangen können zusätzliche Zugbeanspruchungen erzeugt werden. Das Werkstück kommt zuerst mit der Kuppe des Stempels in Kontakt und legt sich an diese an. Mit fortschreitender Bewegung nimmt das Werkstück die Form des Formblocks an (Hoffmann & Neugebauer et al. 2012,

S. 562), siehe Abbildung 5-26. Daher wird das Sichern des Werkstücks durch die Spannzangen bzw. die verwendeten Werkzeuge zur Einspannung realisiert, das Bewegen des Werkstücks erfolgt durch die Bewegung des Stempels und der Spannzangen.

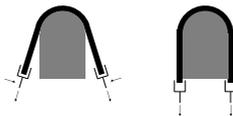


Abbildung 5-26 Streckziehen über einen Formblock nach (Fritz & Schulze 2015, S. 483)

### Übertragbarkeit

Aufgrund der Tatsache, dass beim Streckziehen eine Werkstückdickenabnahme hervorgerufen wird, ist eine unmittelbare Anwendbarkeit für die vorliegende Stapelbildung nicht gegeben. Dass das Werkstück sich an die Kontur des Werkzeugs anlegt und die Werkstückform somit der Werkzeugkontur gleicht, ist ein Aspekt, welcher aufgrund der Unabhängigkeit von den Materialparametern bei der Formgebung für die Stapelbildung wiederzufinden sein sollte.

### 5.6.5 180°-Biegen von Fein- und Mittelblechen

Ein Verfahrensablauf, bei dem Biegeverfahren eingesetzt werden, um eine 180°-Formung zu realisieren, ist das 180°-Biegen von Fein- und Mittelblechen. Daher wird dieser Verfahrensablauf nachfolgend diskutiert.

#### Verfahrensablauf

Bei sogenannten scharfkantigen Biegungen ist der Innenradius annähernd null (Schaub 1980, S. 13). Eine solche 180°-Biegung erfolgt in zwei Schritten: dem Vorbiegen und dem Fertigbiegen, siehe Abbildung 5-27. Nach dem Vorbiegen besteht eine große Umformzone, welche beim Fertigbiegen in die finale Form mit einem Innenradius nahe null überführt wird. Hierbei ist zwischen symmetrischen und asymmetrischen Verfahren zu unterscheiden (Schaub 1980, S. 20). Ein Verfahren der symmetrischen Kategorie ist das Gesenkbiegen mit V-Stempel, ein Vertreter des asymmetrischen Verfahrensablaufs ist das Schwenkbiegen. Das Sichern des Werkstücks beim Fertigbiegen erfolgt lediglich aufgrund der Eigensteifigkeit des Werkstücks, es wird nicht zusätzlich durch ein Werkzeug fixiert. Die Werkzeuge verhindern das Ausdehnen oder Bewegen des

Werkstücks in gewünschte Raumrichtungen, siehe Abbildung 5-27. Das Bewegen des Werkstücks erfolgt aufgrund der Werkzeugbewegungen.

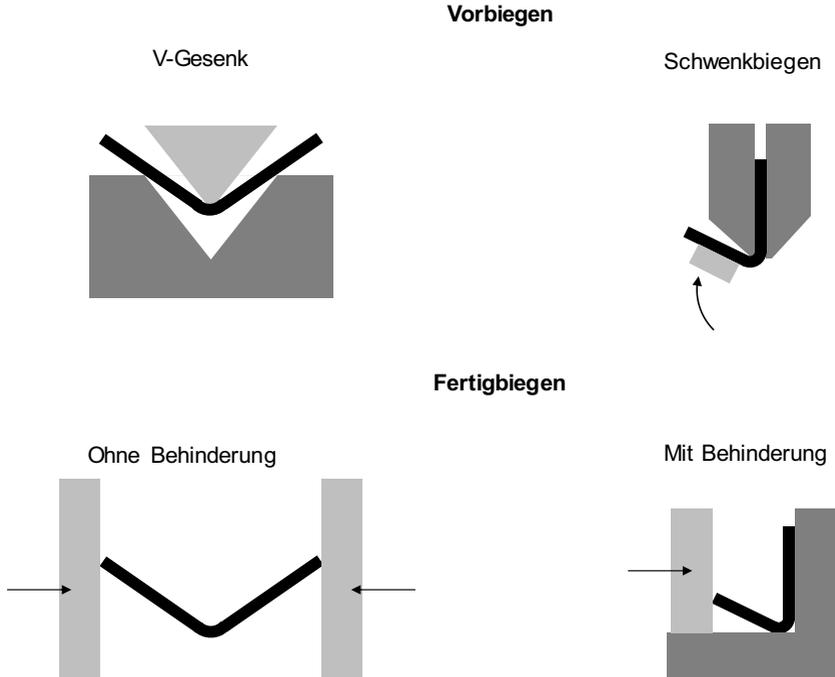


Abbildung 5-27 180°-Biegen nach (Schaub 1980, S. 45)

### Übertragbarkeit

Der Prozessschritt Vorbiegen wird mittels der bereits vorgestellten und diskutierten Biegeverfahren Gesenkbiegen oder Schwenkbiegen realisiert. Das Fertigbiegen ist aufgrund der geringen Eigensteifigkeit der Materialbahnen nicht übertragbar, da die Materialbahn bei diesem Verfahrensablauf in der dargestellten Weise beim Übergang von Vorbiegen zu Fertigbiegen nicht in der Sollposition verharren würde.

Da gemäß (DIN 8580:2003-09, S. 4) Umformverfahren beim Fügen zum Einsatz kommen, wird dies nachstehend diskutiert. Fügen als Fertigungsverfahren kann nochmals in neun Gruppen unterteilt werden (DIN 8593-0:2003-09). An dieser Stelle wird jedoch

lediglich die Untergruppe Fügen durch Umformen (DIN 8593-5:2003-09) betrachtet. Diese Untergruppe kann wiederum weiter unterteilt werden, siehe hierzu (DIN 8593-5:2003-09). Für den im Rahmen dieser Arbeit vorliegenden Anwendungsfall wird das sogenannte Falzen weitergehend betrachtet.

### 5.6.6 Falzen

#### Verfahrensablauf

Beim Falzen werden die zu fügenden Bleche derart ineinandergelegt bzw. ineinandergeschoben, dass durch das anschließende Umlegen der Ränder ein Formschluss erzielt wird (DIN 8593-3:2003-09). Das Falzen kann in drei Verfahrensschritte unterteilt werden, siehe Abbildung 5-28. Beim Biegen um  $90^\circ$  wird das Außenbauteil um  $90^\circ$  gebogen, beim anschließenden Vorfalzen werden die Kanten entsprechend auf  $135^\circ$  vorgefalzt. Die formschlüssige Verbindung wird durch das Biegen des Außenbauteils auf das Innenbauteil beim Fertigfalzen auf  $180^\circ$  hergestellt (Liewald & Hönle et al. 2013, S. 5).

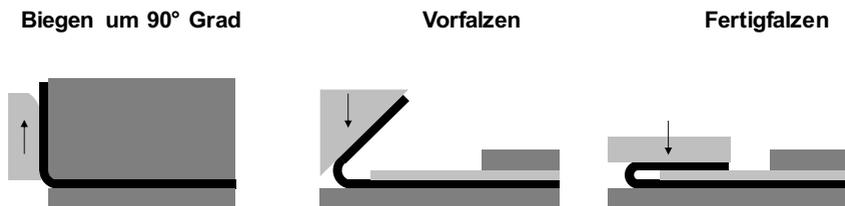


Abbildung 5-28 Falzen nach (Liewald & Hönle et al. 2013, S. 5)

#### Übertragbarkeit

Der erste Verfahrensschritt des Falzens, das Biegen um  $90^\circ$ , wird mit den bereits vorgestellten Biegeverfahren realisiert. Das Vorfalzen und das Fertigfalzen lassen sich mit dem vorgestellten Prozessablauf nicht unmittelbar auf die Verarbeitung einer kontinuierlichen Materialbahn mit geringer Eigensteifigkeit übertragen, da das Werkstück bei diesen Prozessschritten nur durch Werkzeuge bewegt wird. Ein Sichern des Werkstücks erfolgt aufgrund der Eigensteifigkeit der zu falzenden Bleche nicht, dies ist jedoch bei einer kontinuierlichen Materialbahn mit geringen Eigensteifigkeiten erforderlich.

## 5.7 Analogiebildung aus Anwendungsfällen der Papierverarbeitung

Ein weiterer Anwendungsbereich, in dem Materialformungen von 180° realisiert werden, ist die Papierindustrie. Daher werden im Folgenden diese Verfahren vorgestellt, hierbei liegt der Fokus auf den Papierfalzverfahren. Für die Klassifizierung der Falzarten und deren Definitionen sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (Zimmer 2008, Blechschmidt 2013). Es werden die maschinellen Falzprinzipien des Taschenfalzens, Schwertfalzens, Trichterfalzens und Trommelfalzens diskutiert.

### 5.7.1 Taschenfalz

#### Verfahrensablauf

Der zu verarbeitende Papierbogen wird durch die Einzugs- und Falzwalze in die Falztasche gefördert, bis dieser am Anschlag anstößt. Aufgrund der Weiterförderung der beiden Walzen wird der Papierbogen gestaucht und es bildet sich eine Falte im Stauchraum aus. Diese wird von den beiden Falzwalzen erfasst, sodass der Papierbogen entsprechend durch die beiden Falzwalzen geformt und weitergefördert wird (Zimmer 2008, S. 8, Hafner & Dörsam 2011, S. 17). Der Verfahrensablauf ist in Abbildung 5-29 dargestellt. Das Bewegen des Werkstücks erfolgt bei diesem Verfahren aufgrund der Falzwalzen. Ein Sichern erfolgt durch die Einschränkung der Freiheitsgrade in der Falztasche.

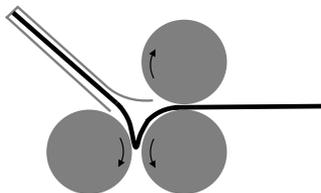


Abbildung 5-29 Taschenfalzprinzip nach (Zimmer 2008, S. 8)

#### Übertragbarkeit

Aufgrund des Verfahrensablaufs ist eine Übertragbarkeit nicht gegeben. Zum einen können keine kontinuierlichen Materialbahnen verarbeitet werden, da der Papierbogen am Anschlag anstoßen muss. Zum anderen ist die Materialformung durch mehrere feststehende Walzen hinweg nicht übertragbar, weil mit solch einer Anordnung die direkte

Ablage der Materialformung auf dem Zellstapel ohne ein Verrutschen des bereits gebildeten (Teil-)Stapels nur schwer realisierbar ist. Des Weiteren haben bei diesem Falzverfahren die Materialparameter einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die sich ausbildende Formung (Blechschmidt 2013, S. 448).

### 5.7.2 Schwertfalz

#### Verfahrensablauf

Beim Schwertfalz wird der Papierbogen, welcher an einem Seitenanschlag anliegt, durch ein Falzmesser zwischen zwei sich gegenläufig drehende Falzwalzen geschlagen. Die beiden Falzwalzen fördern den Papierbogen aufgrund der Reibung zwischen Papier und Walzen weiter und bilden entsprechend den Falz aus (Blechschmidt 2013, S. 447), siehe Abbildung 5-30. Das Bewegen des zu verarbeitenden Materials erfolgt bei diesem Verfahren aufgrund der Bewegung des Schwertfalzes und der Bewegung bzw. Reibung der Falzwalzen. Ein Sichern des Materials erfolgt nur eingeschränkt durch die Auflage des Materials sowie den Seitenanschlag.

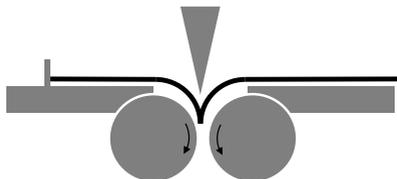


Abbildung 5-30 Schwertfalzen nach (Hafner & Dörsam 2011, S. 19)

#### Übertragbarkeit

Der Verfahrensablauf des Schwertfalzens ist nicht direkt auf den vorliegenden Anwendungsfall übertragbar, da die Verarbeitung von kontinuierlichen Materialbahnen aufgrund der Förderung zwischen zwei Walzen hinweg in dieser Form nicht übernommen werden kann.

### 5.7.3 Trichterfalz

#### Verfahrensablauf

Beim Trichterfalzen kann zwischen Innentrichter- und Außentrichterfalzen unterschieden werden. Der Unterschied ist, ob die Materialbahn den Trichter außen oder innen durchläuft. Die zu verarbeitende Materialbahn läuft durch den Trichter und wird hierbei geformt, die beiden sich gegenläufig drehenden Falzwalzen erzeugen anschließend die

Falz (Zimmer 2008, S. 9). Die Materialförderung erfolgt aufgrund der beiden Zugwalzen, siehe Abbildung 5-31.

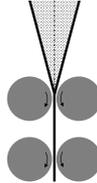


Abbildung 5-31 Trichterfalzen nach (Zimmer 2008, S. 9)

### Übertragbarkeit

Da beim Trichterfalzen die Falz immer längs zur Materialbahn erzeugt wird, ist dieses Prinzip nicht übertragbar. Beim vorliegenden Anwendungsfall ist eine Materialbahnformung quer zur Materialbahn erforderlich. Dieses Falzprinzip längs zur Bahn lässt sich nicht ohne Weiteres in eine Falz quer zur Bahn umwandeln.

### 5.7.4 Trommelfalz

#### Verfahrensablauf

Das Trommelfalzen wird auch als Klappenfalzen bezeichnet (Zimmer 2008, S. 9). Der Verfahrensablauf ist durch drei Zylinder gekennzeichnet. Die Materialbahn wird an dem Sammelzylinder befestigt und durch diesen weitergefördert. Der daneben angeordnete Schneidzylinder schneidet die Materialbahn quer in Einzelsegmente, durch die sich im Inneren des Zylinders befindenden Messer. Anschließend werden die Materialbahnteile durch die Falzmesser des Sammelzylinders in die Falzklappen des Falzklappenzylin-

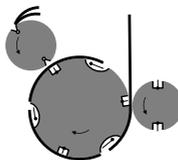


Abbildung 5-32 Trommelfalzen nach (Hafner & Dörsam 2011, S. 21)

## Übertragbarkeit

Die Anwendbarkeit des Trommelfalzprinzips für die Stapelbildung ist nicht gegeben, da dieses Falzprinzip auf der Erzeugung und Verarbeitung von segmentierten Bahnmaterialabschnitten beruht. Eine direkte Übertragung auf die Falzung von kontinuierlichen Materialbahnen ist daher nicht gegeben.

## 5.8 Bewertung bestehender Verfahren zur 180°-Richtungsumkehr

Die vorgestellten Verfahren werden hinsichtlich der Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall zusammenfassend diskutiert. Für den vorliegenden Fall, der Herstellung einer 180°-Umformung quer zur Materialbahn mit parallelen Materialbahnlagen mit geringem Zwischenraum, sodass sich eine U-Form ergibt, bei der die zu verarbeitende Materialbahn aus einer kontinuierlichen Materialbahn mit geringer Eigensteifigkeit besteht, welche materialschonend zu verarbeiten ist und exakt auf den zu bildenden Stapel zu positionieren ist, werden die vorgestellten Verfahren aus der Papierfaltung nicht weiterverfolgt. Das Taschenfalz-, das Schwertfalz- und das Trommelfalzprinzip sind für die Verarbeitung von diskontinuierlichen Materialbahnen ausgelegt, eine Übertragbarkeit auf den vorliegenden Anwendungsfall ist nicht ohne Weiteres gegeben. Das Trichterfalzen erzeugt eine Biegelinie, welche längs anstatt quer zur Materialbahn verläuft, sodass dieses Verfahren nicht weiter betrachtet wird.

Die Betrachtung der Verfahren zur Herstellung einer 180°-Umformung, wie das 180°-Biegen von Feinblechen, das Falzen und das Z-Falten mit Einzelelektrodenblättern zeigt, dass die Prozessabläufe einer solchen Formung aus mehreren Prozessschritten aufgebaut sind. Die diskutierten Biegeverfahren sind daher potenzielle Verfahren für einen Prozessschritt. Hierfür wird das Freie Biegen aufgrund der Nachteile des Einflusses der Materialparameter sowie der Reibbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück nicht weiterverfolgt. Das Gesenkbiegen weist als gebundenes Umformverfahren positive Eigenschaften hinsichtlich der Genauigkeit auf, da das Werkstück der Form des Werkzeuges folgt, aufgrund der Nachteile hinsichtlich der Verarbeitung einer kontinuierlichen Verarbeitung der Materialbahn, der Gleitbewegung zwischen Werkstück und Gesenk sowie des benötigten Arbeitsraumes wird eine direkte Übertragung auf den Anwendungsfall nicht weiterverfolgt. Das Schwenkbiegen eignet sich in seiner ursprünglichen Form nicht für die Verarbeitung einer kontinuierlichen Materialbahn mit geringen Eigensteifigkeiten, weist jedoch positive Eigenschaften hinsichtlich der einsei-

tigen Materialeinspannung und der Abrollbewegung des Werkzeugs auf. Das Streckziehen ermöglicht eine 180°-Materialformung, verringert bei dieser jedoch die Materialdicke. Positiv ist hierbei, dass die Werkzeugkontur die Werkstückform vorgibt.

Die Prozessabläufe des 180°-Biegens von Blech und des Falzens werden für den Anwendungsfall nicht weiterverfolgt, da diese nicht für die Verarbeitung von kontinuierlichen Materialbahnen mit geringen Eigensteifigkeiten geeignet sind. Hieraus ist jedoch ersichtlich, dass für die Realisierung einer 180°-Richtungsumkehr ein mehrstufiger Verfahrensablauf notwendig ist.

Die Faltungsabläufe des Separartorfaltens beim Z-Falten mit Einzelelektrodenblättern sind prinzipiell übertragbar, müssten aber hinsichtlich Umformzonengröße bzw. Materialbahnlängeneinbringung in den Stapel geändert werden.

Zusammenfassend ist somit festzustellen, dass kein Verfahren alle Kriterien erfüllt, so dass in Kapitel 6 ein Verfahrensablauf für die Faltung und deren gezielten Ablage auf dem gebildeten (Teil-)Stapel der kontinuierlichen Elektrodenbahnen mit intermittierender Beschichtung konzipiert wird. Festzuhalten ist zudem, dass durch eine werkzeuggebundene Formung in der Regel eine höhere Genauigkeit erzielt werden kann und für eine 180°-Richtungsumkehr ein mehrstufiger Verfahrensablauf von Nöten ist.

## **5.9 Zusammenfassung Definition Stapelbildungsablauf und Analyse Verfahren zur 180°-Richtungsumkehr**

In Kapitel 5 wurden zunächst die Kriterien der Stapelbildung für den Anwendungsfall des Zweifachen Z-Faltens konkretisiert. Hierbei stehen die materialschonende Verarbeitung, die Stapelgenauigkeit und die Unabhängigkeit von den Materialparametern im Mittelpunkt. Anschließend wurde der Stapelbildungsablauf für die Herstellung des in Kapitel 4 konzipierten Stapeldesigns Zweifaches Z-Falten dargestellt. Bei diesem sind die beiden Separatormaterialbahnen zusammen mit der Anodenmaterialbahn angeordnet, 90° zu diesen ist die Kathodenmaterialbahn angeordnet, sodass der Stapelbildungsablauf mit einer Ablage der drei Materialbahnen, Separator, Anode, Separator startet. Daraufhin ist die Kathodenmaterialbahn auf diese Bahnen abzulegen, aufgrund der einseitigen Kathodenbeschichtung und der um 90° versetzten Anordnung ist die Kathodenmaterialbahn unmittelbar wieder zurückzufalten und auf den Stapel abzulegen. Anschließend erfolgt die Ablage von Separator-, Anoden- und Separatormaterialbahn. Diese Abfolge ist bis zur gewünschten Stapelhöhe zu wiederholen. Aufbauend

auf dieser Abfolge wurden die direkten Zusammenhänge der Parameter in der Stapelbildung erarbeitet und diese in die vier Gruppen Stapelbildung, Materialbahnförderung, Materialbahnablage und Materialparameter unterteilt. Hierbei konnte abgeleitet werden, dass die Materialbahnablage von zentraler Bedeutung ist. Innerhalb der Materialbahnablage hat die Materialbahnformung signifikanten Einfluss. Daher wurden existierende Verfahren zur Materialformung auf ihre Eignung für die im vorliegenden Fall benötigte 180°-Materialformung analysiert. Hierfür wurde eine Analogiebildung aus den Anwendungsbereichen der Blechverarbeitung, der Papierindustrie und der Separatorverarbeitung beim Z-Falten durchgeführt. Kein Verfahren kann unmittelbar angewendet werden, festzuhalten ist jedoch, dass werkzeuggebundene Formungen Vorteile hinsichtlich der Genauigkeit aufweisen sowie dass 180°-Formungen durch mehrstufige Verfahren zu realisieren sind. Aufgrund der Tatsache, dass keines der Verfahren für eine direkt Übertragung auf den vorliegenden Anwendungsfall geeignet ist, gilt es in Kapitel 6 einen geeigneten Prozessablauf für die Materialformung zu konzipieren.

## 6 Entwicklung Verfahrensablauf

Aufbauend auf der Analyse bestehender Technologien, siehe Kapitel 5, ist es notwendig, einen neuen Verfahrensablauf für die Materialbahnformung zur Stapelbildung des definierten Stapeldesigns zu erstellen. Für den Verfahrensablauf werden zunächst Prozessschritte sowie deren Ziele und Randbedingungen definiert. Anschließend werden für die einzelnen Prozessschritte die jeweiligen Materialbahnpositionen parametrisiert.

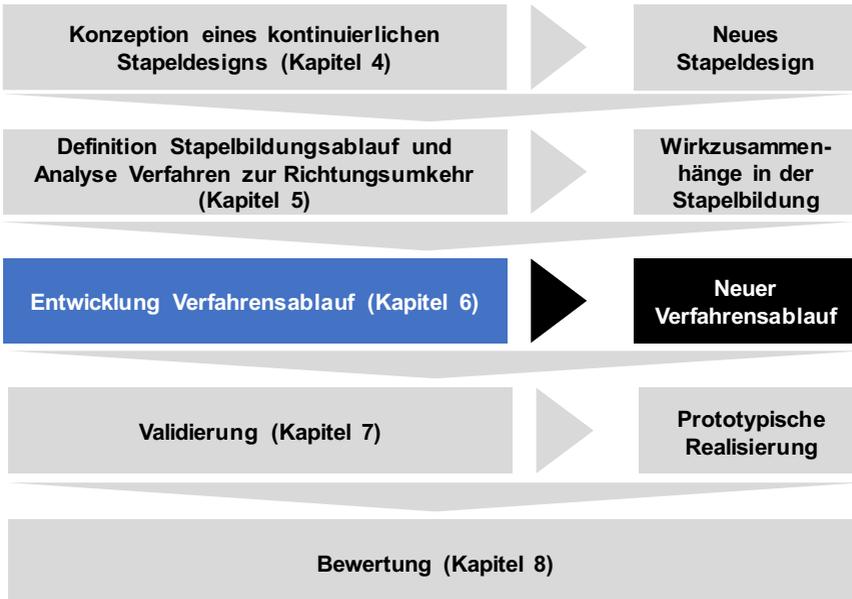


Abbildung 6-1 Vorgehensweise Kapitel 6

### 6.1 Definition der Prozessschritte des Faltungsablaufes

Die Diskussion wird anhand der Anodenmaterialbahn des in Kapitel 4 konzipierten Stapeldesigns Zweifaches Z-Falten durchgeführt, da bei der Elektrodenbahn Anforderungen an die Genauigkeit der Ablageposition gestellt sind. Randbedingungen wie beispielsweise eine Beschränkung des zugänglichen Arbeitsraumes zur Verarbeitung der Anodenmaterialbahn durch die anderen Materialbahnen (Separatormaterialbahnen und Kathodenmaterialbahn) werden bei der Konzeptionierung berücksichtigt. In Abbildung 6-2 sind der abgeleitete Anfangszustand und der abgeleitete Endzustand der Ano-

denmaterialbahn abgebildet. Die Ableitung basiert auf den in Kapitel 5.2 definierten Anordnungen des Stapelbildungsablaufes. Ziel der Entwicklung ist es, ein Verfahren zu definieren, welches die dargestellte Anodenmaterialbahn von ihrem Anfangszustand in den Endzustand überführt.

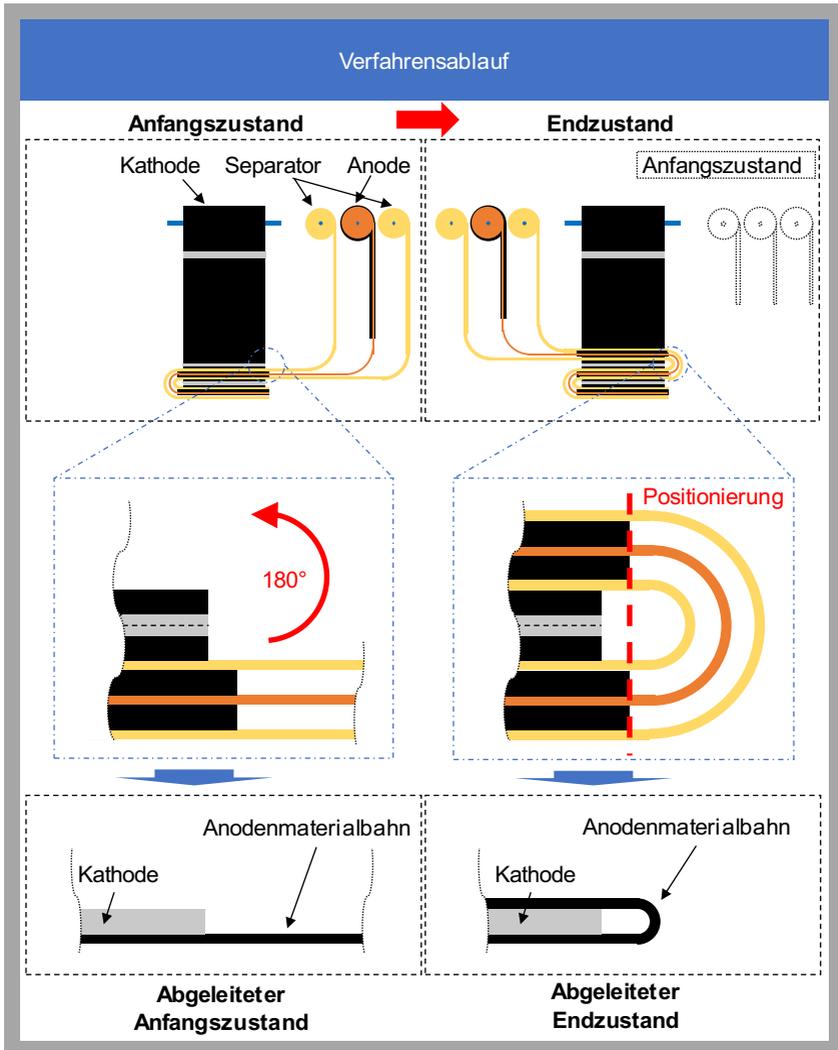


Abbildung 6-2 Abgeleiteter Anfangs- und Endzustand

Von Bedeutung für die Verfahrensentwicklung ist der Ablauf der Formung, dies bedeutet, ob ein einstufiger oder ein zweistufiger Prozessablauf zu realisieren ist. Zudem ist die eigentliche Formgebung ein zu definierendes Merkmal. Hierbei ist zwischen einer

werkzeuggebundenen und werkzeungebundenen Formung zu unterscheiden. Des Weiteren hat die Materialbahnführung einen entscheidenden Einfluss auf die Formung, bei dieser kann entweder die Materialbahn für die Formgebung gesichert werden oder aber freistehend ausgeführt werden. Die Merkmale mit ihren relevanten möglichen Lösungsprinzipien sind in Abbildung 6-3 abgebildet.

| Merkmale                   | Lösungsprinzipien         |                            |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| <b>Ablauf Formung</b>      | Einstufiger Prozessablauf | Zweistufiger Prozessablauf |
| <b>Formgebung</b>          | Werkzeuggebundene Formung | Werkzeungebundene Formung  |
| <b>Materialbahnführung</b> | Materialbahnsicherung     | Freistehende Materialbahn  |

*Abbildung 6-3 Merkmale und Lösungsprinzipien für die Formung*

Aus der Analyse der Verfahren zur Umformung einer 180°-Formung, bei der sich eine „U-Form“ ausbilden soll, sind mehrstufige Verfahren zu bevorzugen, siehe Kapitel 5.8. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den zu verarbeitenden Materialien um kontinuierliche Materialbahnen mit geringer Eigensteifigkeit handelt, ist die Materialbahn bei den Einzelschritten zu stützen und bei den Übergängen von den einzelnen Prozessschritten zueinander zu sichern. Des Weiteren ergibt sich aus der Analyse der Verfahren, dass werkzeuggebundene Formungen tendenziell eine höhere Genauigkeit realisieren können und robuster gegen den Einfluss von Materialparametern sind. Aufgrund dessen ergibt sich die Auswahl der Lösungsprinzipien, wie sie in Abbildung 6-3 dargestellt ist. Zudem leitet sich daraus der in Abbildung 6-4 dargestellte mehrstufige, werkzeuggebundene Verfahrensablauf für kontinuierliche Materialbahnen zur 180°-Formung der Materialbahn für die Herstellung des definierten Stapeldesigns ab.



*Abbildung 6-4 Verfahrensablauf zur Materialbahnformung*

Hierbei wird zunächst in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ aufgrund der Genauigkeit und der Robustheit gegen den Materialparametereinfluss eine werkzeuggebundene Formung durchgeführt. Die Materialbahn wird in Schritt 2 „Materialbahn sichern“ in der Position, welche die werkzeuggebundene Formung in Schritt 1 hergestellt hat, gesichert. Dies ist aufgrund der kontinuierlichen Materialbahn mit geringer Eigensteifigkeit notwendig. In Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ ist der Arbeitsraum zur Materialbahnablage auf den bereits gebildeten (Teil-)Stapel zugänglich zu machen, dies bedeutet, dass der Teil der Materialbahn, der eine 180°-Richtungsumkehr erfahren hat, auf den (Teil-)Stapel abgelegt werden kann. Für diese Ablage ist eine weitere Formung notwendig, welche in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ werkzeuggebunden durchgeführt wird. In Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ muss die Materialbahn, welche durch Schritt 4 in ihre finale Position auf dem (Teil-)Stapel geformt wurde, in dieser Position gesichert werden. Die eingeführten Schritte werden nachfolgend konkretisiert.

### Schritt 1: Erste Werkzeuggebundene Formung

**Ziel des Schrittes** „Erste Werkzeuggebundene Formung“ im mehrstufigen Prozessablauf ist es, die erste Formgebung werkzeuggebunden durchzuführen.

Die **Ausgangssituation** stellt sich wie folgt dar. Die Anodenmaterialbahn ist seitlich des zu bildenden bzw. des bereits gebildeten (Teil-)Stapels angeordnet. Diese seitliche Anordnung ist notwendig, da das Kathodenmaterial  $90^\circ$  versetzt zur Anodenverarbeitungsrichtung angeordnet ist, damit diese gemäß dem Stapelbildungsablauf entsprechend auf den Stapel abgelegt und somit das Stapeldesign realisiert werden kann. Dies ist in Abbildung 6-5 links schematisch dargestellt. Nachdem die Kathodenmaterialbahn abgelegt wurde, erfolgt die Anodenmaterialbahnformung.

**Zielsituation** ist, dass die Formung kleiner als  $180^\circ$  ist, da bei einer werkzeuggebundenen Formung größer  $180^\circ$  das Werkzeug im Inneren der Formung nicht ohne Gleitbewegung von Werkstück und Werkzeug entfernt werden könnte. Damit nicht mehr als die zuvor definierten fünf Prozessschritte benötigt werden, gilt es, die Formung größer als  $90^\circ$  zu realisieren. Die Zielsituation ist in Abbildung 6-5 rechts skizziert. Bei der Formung ist eine materialschonende Verarbeitung zu gewährleisten, diese bedeutet für Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ insbesondere, dass die Mindestbiegeradien der Materialien nicht unterschritten werden dürfen.

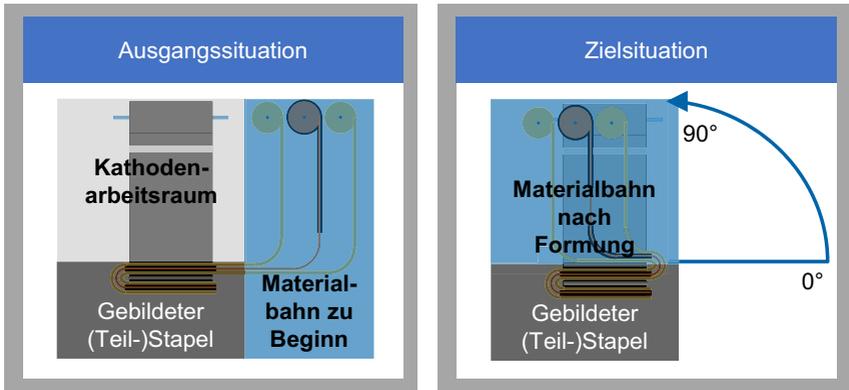


Abbildung 6-5 Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“  
Ausgangs- und Zielsituation

### Schritt 2: Materialbahn sichern

**Ziel** des **Schrittes** „Materialbahn sichern“ ist es, die Materialbahn in ihrer Position von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ zu sichern. Dies ist notwendig, da in Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ das Werkzeug, welches in Schritt 1 verwendet wurde, entfernt werden muss. Die Materialbahn würde zum einen aufgrund ihrer Eigensteifigkeit verrutschen, zum anderen würde die bei kontinuierlichen Materialbahnen zur Verarbeitung herrschende Bahnspannung inkl. Bahnspannungsregelung ein Verrutschen hervorrufen.

### Schritt 3: Zugänglichkeit schaffen

Das **Ziel** des dritten **Schrittes** „Zugänglichkeit schaffen“ ist es, den notwendigen Arbeitsraum für die zweite werkzeuggebundene Formung, Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“, frei zu machen, damit diese die Materialbahn in ihre finale Position auf den Stapel ablegen kann. Dies bedeutet, dass das Werkzeug, welches in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ benötigt wurde, in diesem Schritt zu entfernen ist. Die Materialbahnposition von Schritt 1, welche identisch ist mit der von Schritt 2 „Materialbahn sichern“, soll aufrechterhalten bleiben. Somit ist die Materialbahnsicherung von Schritt 2 beizubehalten. Bei Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ soll keine Formung hervorgerufen werden. Die Tatsache, dass das Werkzeug aus Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ nicht bis zur Ablage der Materialbahn verbleiben sollte, ist in Abbildung 6-6 dargestellt.

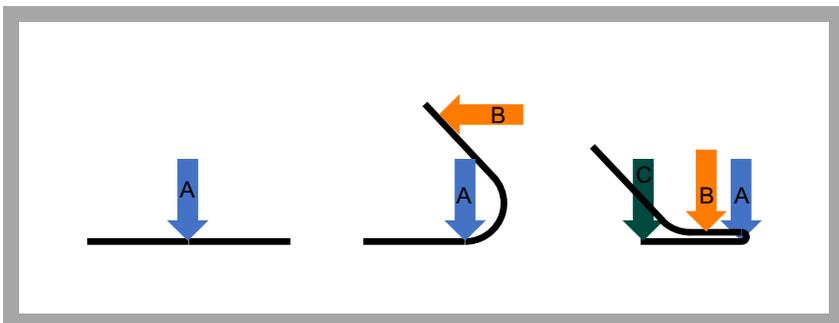


Abbildung 6-6 Vektoren

Der dargestellte Ablauf zeigt schematisch die Kraftvektoren beim Verfahrensablauf zur Materialbahnformung. Kraftvektor A stellt zu Beginn den Kraftvektor dar, welcher dafür

sorgt, dass der bereits abgelegte (Teil-)Stapel nicht verrutscht und nicht durch die Formung beeinflusst wird. Dieser Kraftvektor A sollte daher an den Kanten der bereits abgelegten Bahnen angreifen, sodass die Ränder der abgelegten Bahnen nicht verformt werden können. An dieser Randposition auf der obersten abgelegten Materialbahn ist auch das Werkzeug zur werkzeuggebundenen Formung zu platzieren, an dieses wird dann die Materialbahn angelegt. Dies symbolisiert Vektor B in Abbildung 6-6. Die Materialbahn wird durch dieses im Verlauf auf dem Stapel abgelegt, was zur Folge hätte, dass Vektor A von der Materialbahn umschlungen werden würde. Dies hätte zum einen zur Folge, dass dieser nicht ohne Gleitbewegung mit der Materialbahn aus dieser entfernt werden könnte, zum anderen, dass in diesem Bereich die Materialbahn in einem zusätzlichen Prozessschritt komprimiert werden müsste. Dabei würde eine hohe Belastung aufgrund der kleinen Biegeradien für die Materialbahn entstehen, sodass in diesem Bereich keine Beschichtung der Elektroden realisiert werden könnte, was zu einer geringeren Energiedichte des Stapels führen würde. Daher ist, wie in Abbildung 6-6 angedeutet, der bereits gebildete (Teil-)Stapel durch einen weiteren Vektor (C) zu sichern, sodass Randvektor A entfernt werden kann, bevor die Materialbahn durch Vektor C auf dem Stapel abgelegt wird. Dieses Entfernen der am Rand befindlichen Komponenten und damit die Gewährleistung der Zugänglichkeit der Materialbahnablage ist in Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ durchzuführen.

#### **Schritt 4: Ablegende Werkzeuggebundene Formung**

**Ziel** dieses **Schrittes** „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ist es, die Materialbahn in ihre finale Sollposition auf dem Stapel zu überführen. Hierbei ist die genaue Ablage wichtig, damit die Beschichtungskanten der Elektroden eine exakte Überdeckung aufweisen.

Die **Ausgangssituation** zu Beginn von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ist, dass die Materialbahn sowohl auf dem Stapel gesichert ist als auch an einem weiteren Punkt der Materialbahn, welcher nicht auf dem Stapel ist, sondern sich zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$  befindet. Dieser zweite Sicherungspunkt der Materialbahn wurde in Schritt 2 „Materialbahn sichern“ eingebracht und ist weiter aufrechtzuerhalten, siehe hierzu Abbildung 6-7 links. Zwischen diesen beiden Fixpunkten wurde der Arbeitsraum in Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ zugänglich gemacht, sodass in diesem Bereich die finale Ablage auf dem Stapel erfolgen kann. Dies bedeutet jedoch auch, dass die Materialbahnposition nicht mehr durch eine Werkzeugkontur definiert wird. Damit ist die

Materialbahnposition nicht mehr eindeutig definiert, da Materialeffekte wie beispielsweise die Rückfederung die Materialbahnposition verändert haben könnten, welche durch die werkzeuggebundene Formung in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ definiert wurde. Aufgabe von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ist es daher zunächst, wieder eine definierte Materialbahnposition herbeizuführen. Dies ist aufgrund der geforderten Ablagegenauigkeit der Beschichtungsbereiche der Elektroden notwendig. Die Materialbahnposition ist an zwei Stellen definiert, an den beiden Fixpunkten. Ausgehend von diesen ist daher die werkzeuggebundene Formung in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ zu realisieren. Dies ist allerdings nur ausgehend vom oberen Fixpunkt möglich, da die Zugänglichkeit des unteren Punktes durch den bereits gebildeten (Teil-)Stapel nicht gegeben ist.

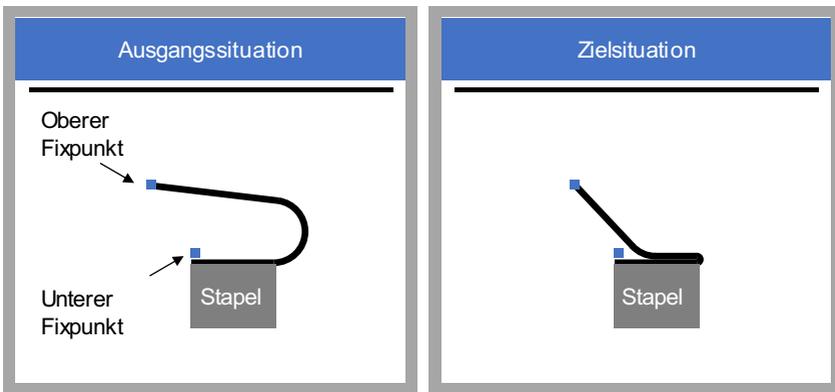


Abbildung 6-7 Ausgangs- und Zielsituation Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“

Die **Zielsituation** von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ist in Abbildung 6-7 rechts dargestellt. Hierbei ist die Materialbahn in ihrer finalen Sollposition in einem äußeren Teilbereich auf dem Stapel. Damit diese Sollposition definiert hergestellt werden kann und sich somit die beschichteten Bereiche präzise übereinander befinden, muss die Länge des Materialbahnverlaufes zwischen den Fixpunkten zu Beginn von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ mit der Länge des Materialbahnverlaufes am Ende von Schritt 4 identisch sein. Die Materialbahnlänge zu Beginn von Schritt 4 wird durch die werkzeuggebundene Formung in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ definiert. Daher leitet sich die Bedingung ab, dass die Materialbahnlänge von Schritt 1 zwischen den Fixpunkten mit der Materialbahnlänge von

Schritt vier übereinstimmen muss. Aus diesem Grund sind die Werkzeuge entsprechend zu positionieren und zu gestalten. Wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist, kann entweder die definierte Sollposition der Materialbahn nicht realisiert werden oder aber es müssten die Fixpunkte entsprechend der Längenabweichung verschoben werden. Da dies allerdings einen weiteren Prozessschritt bedeuten würde, wird diese Möglichkeit nicht weiterverfolgt.

### Schritt 5: Materialbahn sichern

**Ziel** von **Schritt 5** „Finale Materialbahnsicherung“ ist es, die Materialbahn in ihrer finalen Sollposition zu sichern. Dies bedeutet, dass die Materialbahnposition von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ in dem Bereich, welcher in die finale Position auf dem Stapel gebracht worden ist, auf dem Stapel so fixiert wird, dass die Werkzeuge der Schritte 1 bis 4 entfernt werden können und die Materialbahn komplett direkt auf den bereits gebildeten (Teil-)Stapel abgelegt werden kann.

Aus der Diskussion der Ausgangs- und Zielsituationen der Schritte geht hervor, dass für die Länge der Materialbahnen von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ identisch sein müssen, da die werkzeuggebundene Formung so durchzuführen ist, dass das Material der Werkzeugkontur folgt. Die Schritte 2 „Materialbahn sichern“, 3 „Zugänglichkeit schaffen“ und 5 „Finale Materialbahnsicherung“ sollen keine Positionsänderung der Materialbahn hervorrufen. Daher werden die Randbedingungen und Abhängigkeiten der Schritte, insbesondere der Schritte 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“, sowie die notwendigen Abläufe der Schritte zur Erreichung der jeweiligen Schrittziele im Folgenden genauer beleuchtet. Für eine eindeutige Beschreibung wird zunächst ein Koordinatensystem am Stapeldesign eingeführt.



Abbildung 6-8 Koordinatensystem

In Abbildung 6-8 ist die 180°-Richtungsumkehr einer Anodenmaterialbahn gemäß dem in Kapitel 4 ausgewählten Stapeldesign dargestellt. Da der Formungsablauf anhand der Anodenbahn diskutiert wird, wird der Ursprung des Koordinatensystems mit Bezug zur Anode festgelegt. Der Nullpunkt der x-Achse liegt daher an der Beschichtungskante der untersten Anodenbahn, der Nullpunkt der y-Achse ist der Mittelpunkt der Trägerfolie der Anode, ebenfalls von der untersten Anodenbahn.

Die Materialbahnverläufe der einzelnen Schritte – ausgehend vom Urzustand – sind in Abbildung 6-9 dargestellt. Im Folgenden werden die Abläufe näher diskutiert.

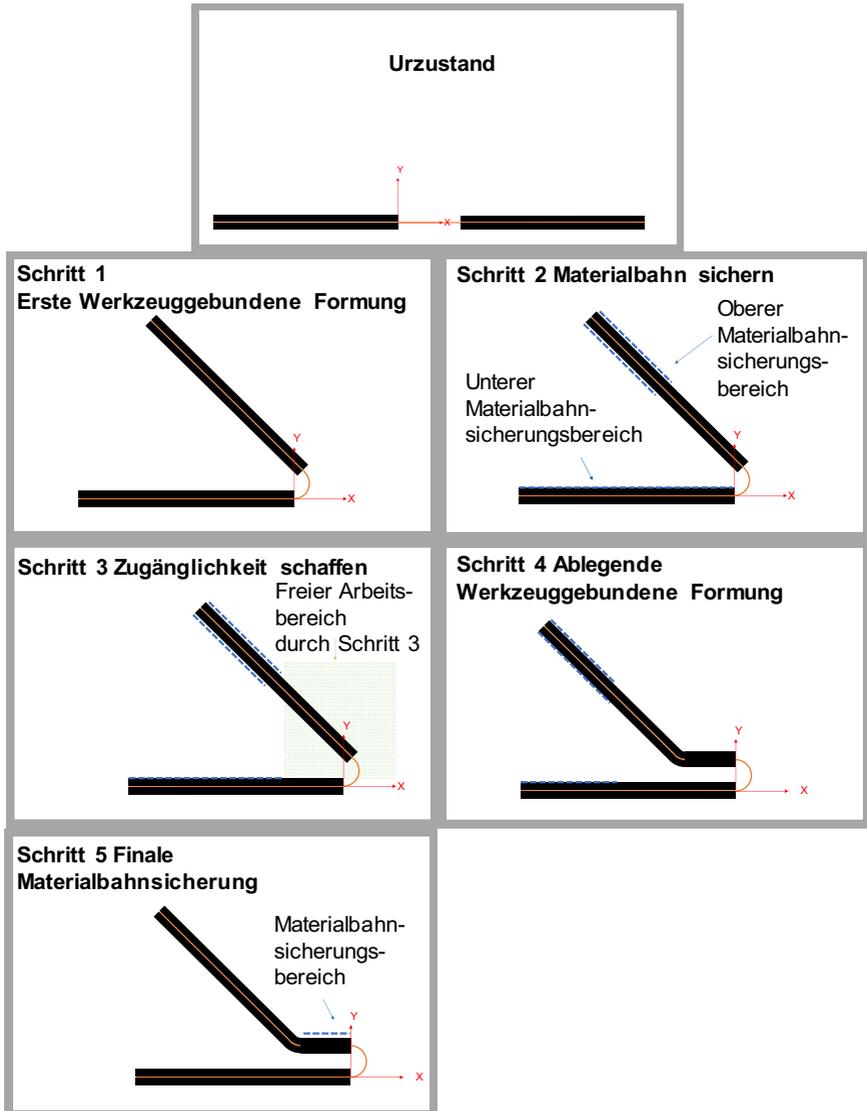


Abbildung 6-9 Materialbahnverlauf

**Ablauf Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“:**

Zur Erreichung des Zieles von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ muss zunächst der bereits gebildete (Teil-)Stapel gesichert werden, sodass dieser nicht durch den Formungsvorgang beeinflusst wird. Die Formung soll hierbei zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$  betragen. Daher muss das **Sichern** auf dem Stapel erfolgen, sodass der y-Wert, bei welchem die Funktion Sichern realisiert werden muss, durch den bereits gebildeten Stapel und damit der vorliegenden Stapelhöhe vorgegeben wird. Da keine beschichtete Fläche durch die Formung gekrümmt werden soll, sollte der x-Wert null betragen. Neben dem Sichern wird in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebunden Formung“ ein Werkzeug benötigt, dessen Kontur den Sollmaterialbahnverlauf vorgibt. Zum Anlegen an diese **Werkzeugkontur** muss die Materialbahn bewegt werden. Die für die Formung relevante Werkzeugkontur beginnt bei einem x-Wert von größer gleich null, da ansonsten der bereits abgelegte Stapel verformt würde, und endet, gemäß Abbildung 6-10 rechts, im negativen x-Bereich. Die Position der Werkzeugkontur in y-Richtung wird durch die bereits abgelegten Materialbahnen vorgegeben. Zudem ist die Werkzeugkontur so zu gestalten, dass eine materialschonende Verarbeitung der Materialbahn realisiert werden kann. Dies bedeutet, dass die entsprechenden Mindestbiegeradien einzuhalten sind und scharfkantige Elemente an der Werkzeugkontur zu vermeiden sind. Entscheidend ist die Länge der Werkzeugkontur, da diese maßgeblichen Einfluss auf die spätere Genauigkeit der Materialbahnablage hat. Das **Bewegen** ist so zu realisieren, dass sich die Materialbahn an die Werkzeugkontur anlegt. Hierfür ist die Materialbahn entsprechend in negativer x-Richtung zu bewegen.

Daher stellen das Sichern, die Werkzeugkontur und das Bewegen der Materialbahn zum Anlegen an die Werkzeugkontur die drei wesentlichen Bestandteile von Schritt 1 dar. Aufgrund der Tatsache, dass die Werkzeugkontur in Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ entfernt wird und die bereits abgelegten Materialbahnen für die zweite werkzeuggebundene Formung in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebunden Formung“ weiterhin fixiert sein müssen, sind das Sichern und die Werkzeugkontur getrennt zu realisieren. Aus diesem Grund ist das Sichern in Abhängigkeit der Werkzeugkontur von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebunden Formung“ und der Werkzeugkontur von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebunden Formung“ zu gestalten.

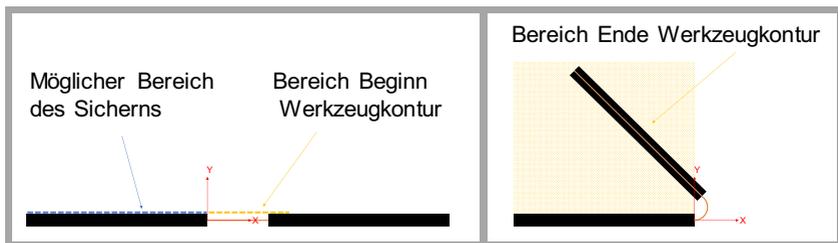


Abbildung 6-10 Arbeitsbereiche Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“

### Ablauf Schritt 2 „Materialbahn sichern“:

Für die Erfüllung der Zielsetzung von Schritt 2 „Materialbahn sichern“ wird die **Funktion Sichern** benötigt. Randbedingung ist, dass die Materialbahnposition im Umformbereich dadurch nicht verändert wird. Die Sicherung der Materialbahn soll so erfolgen, dass diese auch durch das Entfernen des Werkzeuges in Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ weiterhin aufrechterhalten bleibt und zudem auch während der Schritte 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ und 5 „Finale Materialbahnsicherung“ besteht. Daher sind zwei Bereiche der Materialbahnpositionssicherung notwendig. Ein Bereich ist der bereits in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ eingeführte Bereich direkt auf dem gebildeten (Teil-)Stapel. Der zweite Bereich ist bei der umzuformenden Materialbahn, welche sich über dem Stapel befindet, siehe Abbildung 6-11. Beide Materialbahnsicherungen sind so zu gestalten, dass diese bis inklusive Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ ohne eine Änderung aufrechterhalten bleiben können. Daher sind die beiden Sicherungsbereiche in Abhängigkeit von den Werkzeugen in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ zu definieren.

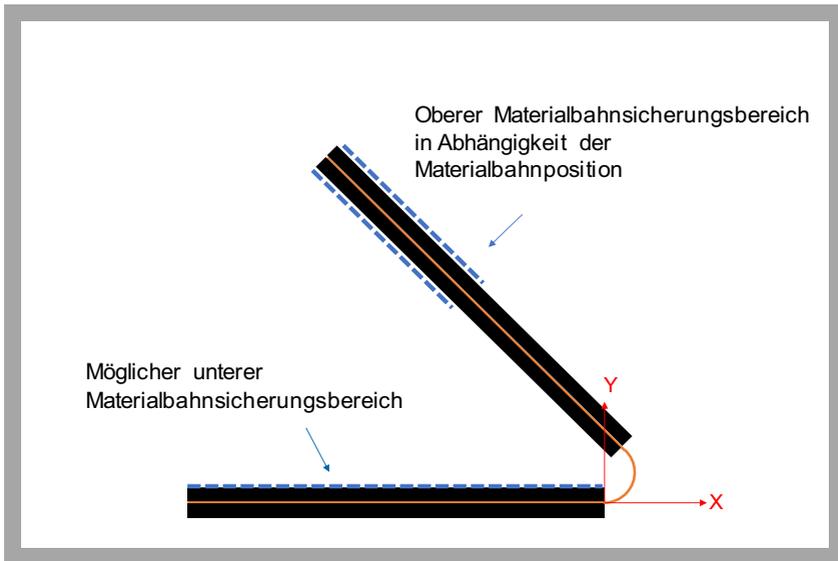


Abbildung 6-11 Sicherungsbereiche in Schritt 2 „Materialbahn sichern“

### Ablauf Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“:

Für die Schaffung der Zugänglichkeit des Ablagebereiches auf dem Stapel wird in Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ das **Werkzeug** der Formung von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“, welches sich innerhalb des Ablagebereiches befindet, aus diesem **bewegt**. Hierbei gilt es zu beachten, dass möglichst keine Gleitbewegungen von Werkzeug und Materialbahn hervorgerufen werden, sodass eine materialschonende Verarbeitung gewährleistet werden kann. Zudem sollte die freie Materialbahnlänge, die Länge zwischen dem unterem und dem oberen Sicherungspunkt, aufgrund der geringen Eigensteifigkeit der Materialbahn minimal ausgeführt werden. In Abbildung 6-12 links ist die Zielsituation von Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ und damit die Ausgangssituation für Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ dargestellt. Die Abmessungen des benötigten Ablagebereiches auf dem Stapel sind vom Werkzeug von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ und der Sicherung auf dem Stapel in Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ abhängig. Hieraus ist er-

sichtlich, dass der untere Sicherungsbereich, welcher in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ initiiert wird und bis Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ aufrechterhalten werden soll, nicht in den Arbeitsbereich der Schritte 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ bzw. 5 „Finale Materialbahnsicherung“ hineinragen darf und daher die Sicherung nicht bis an die Beschichtungskante reichen kann.

#### **Ablauf Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“:**

Ziel von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ist es, eine werkzeuggebundene Formung der Materialbahn durchzuführen, sodass diese sich anschließend in einem Teilbereich in ihrer finalen Sollposition auf dem Stapel befindet und in Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ dort gesichert werden kann. Hierfür ist das Aufrechterhalten der Funktion **Sichern** der Schritte 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und 2 „Materialbahn sichern“, eine **Werkzeugkontur**, welche den Materialbahnverlauf definiert, und das **Bewegen** bzw. Anlegen der Materialbahn an die Werkzeugkontur notwendig. Die Formung soll wie zuvor hergeleitet ausgehend vom oberen Sicherungsbereich erfolgen, sodass die Werkzeugkontur am oberen Sicherungsbereich beginnt. Bei der Werkzeugkontur sind die Einhaltung der minimalen Biegeradien und die Vermeidung von scharfkantigen Konturen zu beachten. Die Abmessungen des Bereiches der Materialbahn, der auf den Stapel abgelegt werden soll, sind abhängig vom benötigten Bereich des Sicherns in Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“. Damit eine genaue Ablage erfolgen kann, ist jedoch entscheidend, dass die Materialbahnlänge der Schritte 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ bzw. 2 „Materialbahn sichern“ identisch mit der Materialbahnlänge von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ist. Maßgebend ist hierbei die Länge von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“, da diese die Sollposition auf dem Stapel beinhaltet. Die Randbedingungen und Abhängigkeiten der verschiedenen Bereiche sind in Abbildung 6-12 dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass in dem durch Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ zugänglich gemachten Bereich der Materialbahnverlauf durch Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ werkzeuggebunden hergestellt werden soll. Dieser Bereich kann nochmals unterteilt werden in einen Bereich, welcher die finale Position der Materialbahn umfasst, dieser wird in Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ auf den Stapel fixiert, und in einen Bereich, der den durch Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ definierten Materialbahnverlauf umfasst.

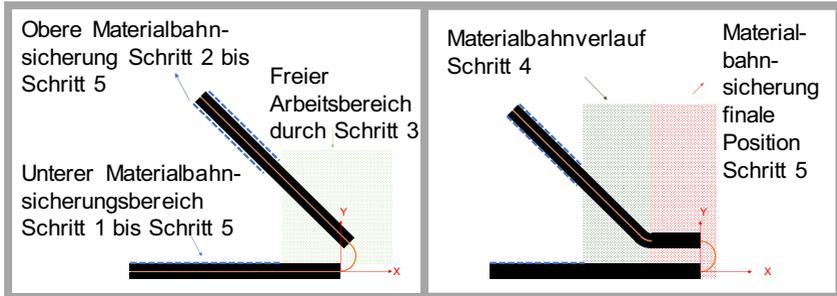


Abbildung 6-12 Ausgangs- und Zielmaterialbahnverlauf Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“

### Ablauf Schritt 5 Finale Materialbahnsicherung:

Ziel von Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ ist es, den Teil der Materialbahn, welcher durch Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ in seine finale Position auf dem gebildeten (Teil-)Stapel überführt wurde, auf dem Stapel zu **sichern**. Dieser Bereich ist in Abbildung 6-12 rot schraffiert dargestellt. Nach Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ sind die benötigten Werkzeuge und Sicherungspunkte der Schritte 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ bis 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ zu entfernen, damit die Materialbahn komplett auf dem Stapel abgelegt werden kann.

### Zusammenhang Werkzeugkontur Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und Werkzeugkontur Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“:

Entscheidend für die exakte Ablage der Materialbahn auf dem Stapel ist, dass bei der Formung in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ die Sollposition erreicht wird. Die Formung erfolgt hierbei ausgehend von der oberen Sicherungsstelle, welche in Schritt 2 „Materialbahn sichern“ eingebracht wurde. Die Sollposition der Beschichtungskante bei der Ablage stellt sich demnach nur dann ein, wenn die Materialbahn sich ausgehend vom oberen Sicherungsbereich an die Werkzeugkontur anlegt und die Länge der Materialbahn zwischen dem unteren und dem oberen Sicherungs-

bereich der Länge der definierten Materialbahn in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ entspricht. Aufgrund der Tatsache, dass die Länge der Materialbahn zwischen den beiden Sicherungsbereichen durch die Werkzeugkontur in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“, respektive durch das Sichern in Schritt 2 „Materialbahn sichern“, definiert wird und die maßgebende Materialbahnlänge durch die Werkzeugkontur in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ definiert wird, wird deren Zusammenhang nachfolgend diskutiert. Ziel ist es, für eine materialschonende Verarbeitung einen Materialbahnverlauf mit möglichst wenigen Richtungsänderungen zu definieren.



Abbildung 6-13 Gemeinsame Fixpunkte der Materialbahnverläufe

In Abbildung 6-13 ist die Situation nochmals dargestellt. Der Materialbahnverlauf in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ muss mindestens eine Biegung aufweisen, damit sich die Materialbahn im definierten Bereich zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$  befindet, siehe Abbildung 6-13 links. Der Materialbahnverlauf in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ muss nach dem für Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ benötigten Bereich, welcher die Sollposition der Materialbahn auf dem Stapel ist, eine Biegung aufweisen. Dies ist dadurch begründet, dass der obere Sicherungsbereich der Materialbahn nicht direkt auf dem Stapel sein kann, da dieser direkt an die Werkzeugkontur von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ anschließen muss. Aufgrund dessen gilt es, den Materialbahnverlauf der beiden Schritte so zu definieren, dass der notwendige gemeinsame Sicherungsbereich unter Einhaltung des Mindestbiegeradius und aller weiteren Eigenschaften der materialschonenden Verarbeitung realisiert werden kann. Aus Abbildung 6-13 ist ersichtlich, dass der gemeinsame Sicherungsbereich mit anschließendem identischen Materialbahnverlauf nur mit

einer weiteren Richtungsänderung erzielt werden kann. Für die Implementierung der Richtungsänderung bestehen zwei Möglichkeiten: entweder eine Integration in den Verlauf von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ oder in den Verlauf von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“. Die beiden Möglichkeiten sind in Abbildung 6-14 aufgezeigt.

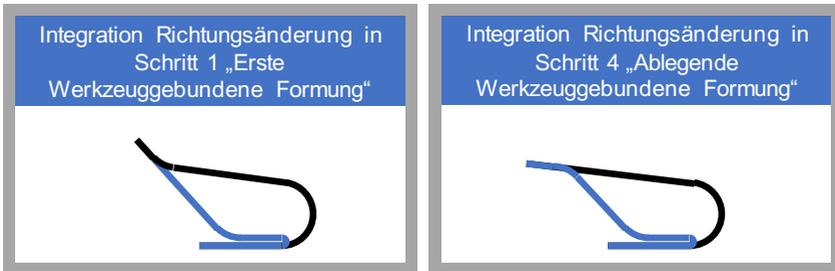


Abbildung 6-14 Integration Richtungsänderung in den Materialbahnverlauf

Die erzielbaren Genauigkeiten sind bei den beiden Varianten als gleichwertig zu bewerten. Eine materialschonende Verarbeitung ist ebenfalls als vergleichbar anzusehen. Unterschiede ergeben sich jedoch bei der Betrachtung der Formungsschritte. Bei der Integration der zusätzlichen Richtungsänderung in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ wird ein zusätzlicher Formungsschritt benötigt. Im Materialbahnverlauf sind zwei unterschiedliche Krümmungsrichtungen zu realisieren. Die Formungsschritte zur Herstellung dieser müssen aufgrund der Tatsache, dass die Materialbahn sich an die Werkzeugkontur anlegen soll und die Materialbahnförderung dazu einen zusätzlichen Bewegungsvorgang durchführen müsste, in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ nacheinander durchgeführt werden. Die Realisierung der zusätzlichen Richtungsänderung in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ kann in einem Vorgang dargestellt werden, da die Materialbahn bei Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ausgehend vom oberen Sicherungsbereich geformt wird. Daher wird die Integration der Richtungsänderung in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ weiterverfolgt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der konzipierte Verfahrensablauf zur 180°-Materialbahnformung für die Herstellung des Stapeldesigns Zweifaches Z-Falten, Ka-

pitel 4, aus fünf Prozessschritten besteht. Für diese konnten die Ziele sowie deren Ausgangs- und Zielsituationen definiert werden. Zudem wurden die Abhängigkeiten der Schritte zueinander hergeleitet, hieraus geht hervor, dass für die Genauigkeit der Materialbahnablage auf dem gebildeten (Teil-)Stapel eine identische Länge der Materialbahn von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ beziehungsweise Schritt 2 „Materialbahn sichern“ mit der Länge der Materialbahn in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ erforderlich ist. Aufgrund dieser Tatsache gilt es, die Materialbahnverläufe respektive die erzeugenden Werkzeugkonturen so zu gestalten, dass diese Bedingung erfüllt wird. Im Folgenden werden daher die Materialbahnverläufe parametrisiert.

## 6.2 Parametrisierte Materialbahnverläufe

Damit die Längengleichheit der Materialbahnen der Schritte 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ gewährleistet werden kann, werden die Materialbahnen zunächst parametrisiert, sodass darauf aufbauend die parametrisierten Materialbahnen gleichgesetzt werden können. Die Parametrisierung wird allgemein durchgeführt, sodass die Zellabmessungen geändert werden können. Auf Basis der ermittelten Materialbahnverläufe können die notwendigen Werkzeugkonturen abgeleitet werden. Die Parametrisierung wurde in (A\_Salem 2017) betrachtet.

### Parametrisierter Materialbahnverlauf Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“

Für die Materialbahnverläufe gilt, dass zwischen geraden und gekrümmten Abschnitten ein tangentialer Übergang erfolgen muss, damit eine materialschonende Verarbeitung realisiert werden kann. Für die Parametrisierung wird die neutrale Faser der Anodenmaterialbahn zu Grunde gelegt. Diese ist in Abbildung 6-15 in schwarz dargestellt. Zur Veranschaulichung wurde zudem nochmals die Lage der Kathode skizziert. Die Anodenmaterialbahn in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ weist zwei gerade verlaufende Abschnitte und einen gekrümmten Abschnitt auf, sodass die Materialbahn sich im benötigten Bereich zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$  befindet. PE ist beim Materialbahnverlauf der Punkt, in welchem die Bahn in Schritt 2 „Materialbahn sichern“ fixiert wird. Diese Fixierung ist bis Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ aufrechtzuerhalten. PA ist der untere Sicherungspunkt, welcher ebenfalls bis Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ beibehalten werden muss. Aufgrund der umlaufend größeren beschichteten

Anodenfläche gegenüber der Kathodenfläche weist die parametrisierte Anodenbahn ein Segment mit der Bezeichnung Ü auf, dieser ist der Überstand von Anode zu Kathode. Der Abschnitt F der Materialbahn ist der Bereich, welcher für die Fixierung der Bahn in Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ auf dem Stapel benötigt wird. Der Krümmungsradius R1, die Länge des geraden Abschnittes b sowie dessen Neigungswinkel  $\alpha$  und der horizontale Geradenabschnitt X1 sind die weiteren Parameter, welche den Materialbahnverlauf in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ definieren.

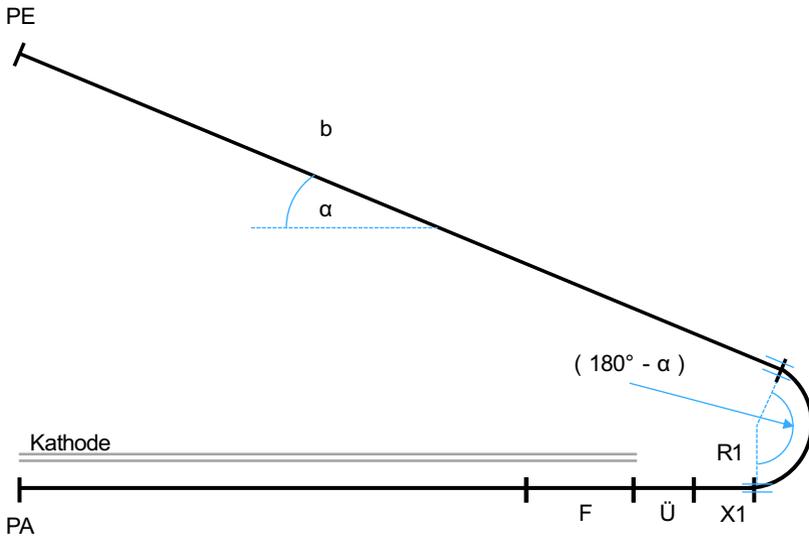


Abbildung 6-15 Parametrisierter Materialbahnverlauf Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“

#### Parametrisierter Materialbahnverlauf Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“

Die Parametrisierung des Materialbahnverlaufes der neutralen Faser der Anodenmaterialbahn von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ist in Abbildung 6-16 dargestellt. Der Materialbahnverlauf beginnt dabei, ausgehend vom Punkt PE, zunächst mit einer Geraden der Länge  $e$  mit demselben Steigungswinkel  $\alpha$  wie der Materialbahnverlauf von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“. Da die Steigung

der Geraden zu Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ identisch sein muss, wird derselbe Parameter,  $\alpha$ , verwendet. An die Gerade anknüpfend folgt, wie zuvor abgeleitet, die notwendige zusätzliche Krümmung mit dem Radius  $R_{42}$  und dem Öffnungswinkel  $\gamma$ . Des Weiteren weist der Verlauf einen Geradenabschnitt mit Länge  $d$  und Steigungswinkel  $\beta$  auf, gefolgt von einer weiteren Krümmung mit dem Radius  $R_{41}$  und dem Öffnungswinkel  $\beta$ . Der Öffnungswinkel dieser Krümmung ist identisch mit der Steigung der Geraden aufgrund von Wechselwinkeln und der Tatsache, dass tangentielle Übergänge gefordert sind und der Abschnitt, welcher der Krümmung folgt, horizontal angeordnet ist. Dies liegt daran, da dies der Bereich ist, welcher in die finale Sollposition auf dem Stapel überführt wurde. Dieser U-förmige Bereich wird daher vom Stapeldesign bestimmt, zum einen durch den Parameter  $\ddot{U}$  und zum anderen durch die Intermittierungslückenbreite, welche diesen Krümmungsverlauf bestimmt. Analog zu Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ weist auch dieser Bahnverlauf den benötigten Fixierbereich,  $F$ , für Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ auf.

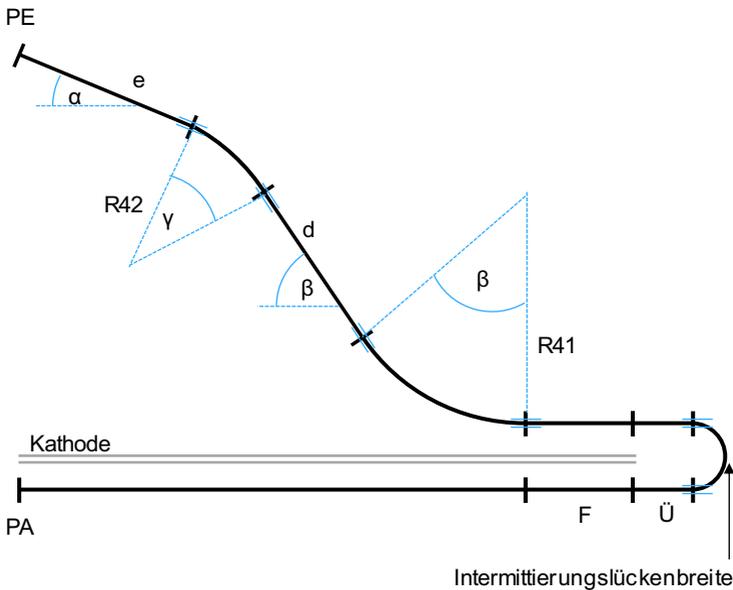


Abbildung 6-16 Parametrisierter Materialbahnverlauf Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“

Für die Materialbahnverläufe der Schritte 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ gilt neben der identischen Länge der Materialbahnen zudem die Bedingung, dass der Punkt PE, welcher den gemeinsamen Sicherungsbereich darstellt, bei beiden Verläufen übereinstimmt und damit dieselben Koordinaten aufweist. Der horizontale Verlauf der bereits abgelegten Materialbahn ist ebenfalls identisch. Daher müssen folgende drei Bedingungen erfüllt sein:

$$Bahnlänge_{Schritt\ 1} = Bahnlänge_{Schritt\ 4} \quad \text{Formel 6-1}$$

$$PE_{X_{Schritt\ 1}} = PE_{X_{Schritt\ 4}} \quad \text{Formel 6-2}$$

$$PE_{Y_{Schritt\ 1}} = PE_{Y_{Schritt\ 4}} \quad \text{Formel 6-3}$$

Aus diesem Grund werden nachfolgend für die beiden Materialbahnverläufe die Bahnlängen sowie die Koordinaten des Punktes PE ermittelt.

#### **Materialbahnlänge Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“**

Die Materialbahnlänge wird ausgehend vom Koordinatenursprung berechnet, da der bereits abgelegte Abschnitt inklusive  $\ddot{U}$  bei beiden Verläufen identisch ist. Daher setzt sich die Materialbahnlänge von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ wie folgt zusammen:

$$Bahnlänge_{Schritt\ 1} = X1 + 2 * \pi * R1 * \left( \frac{180^\circ - \alpha}{360^\circ} \right) + b \quad \text{Formel 6-4}$$

#### **Materialbahnlänge Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“**

Die Materialbahnlängenberechnung von Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ beginnt analog zu Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ im Koordinatenursprung. Zur Berechnung der Länge des ersten Krümmungsabschnittes wird zunächst der Winkel  $\gamma$  bestimmt:

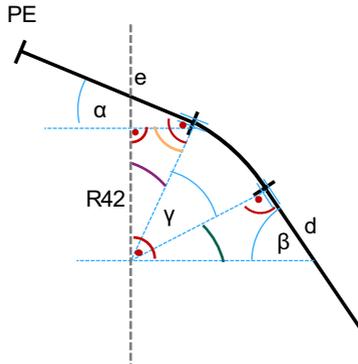


Abbildung 6-17 Winkelbeziehungen Krümmungsabschnitt  $\gamma$  Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“

Aus den in Abbildung 6-17 dargestellten Winkelbeziehungen des Winkels  $\gamma$  geht hervor, dass der Winkel  $\gamma$  sich aufgrund der tangentialen Übergänge und der Winkelsummen der Dreiecke wie folgt zusammensetzt:

$$\gamma = \beta - \alpha$$

Formel 6-5

Daher ergibt sich die Materialbahnlänge mit den mittels Bogenmaß berechneten Krümmungsabschnitten zu:

*Bahnlänge*<sub>Schritt 4</sub>

$$= \text{Intermittierungslückenbreite} + \ddot{U} + F \\ + \left[ \frac{\beta}{360^\circ} * (2 * \pi * R41) \right] + d + \left[ \frac{\beta - \alpha}{360^\circ} * (2 * \pi * R42) \right] \\ + e$$

Formel 6-6

**Koordinaten Punkt PE Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“**

x-Komponente:

Die Koordinaten des Punktes PE werden auf das bereits eingeführte Koordinatensystem bezogen, daher ergibt sich die x-Komponente von PE in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ aus dem x-Anteil des Geradenabschnittes b abzüglich X1 und des Teilstückes von b, welches sich im Krümmungsbereich befindet, siehe Abbildung 6-18.

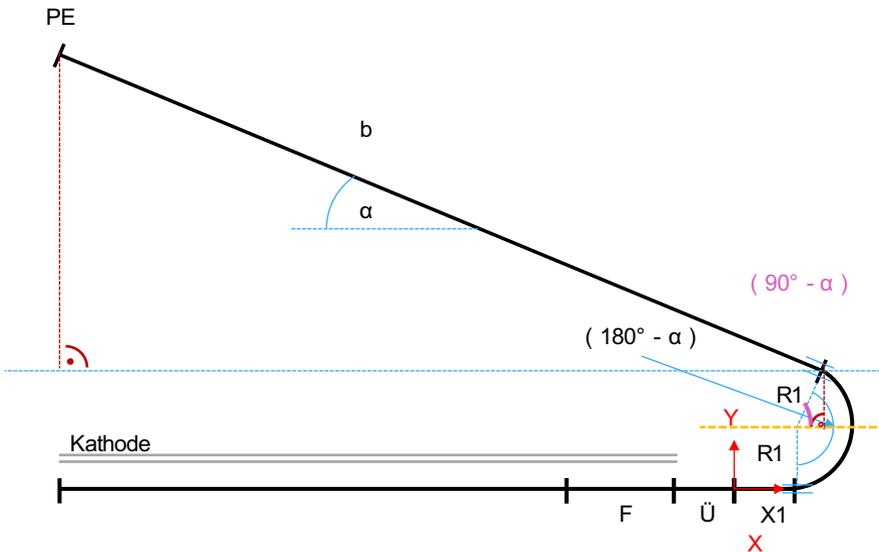


Abbildung 6-18 Zusammenhänge Punkt PE Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“

$$PE_{x_{Schritt\ 1}} = [\cos(\alpha) * b] - X1 - [\sin(\alpha) * R1]$$

Formel 6-7

y-Komponente:

Die y-Komponente von PE der neutralen Faser setzt sich gemäß Abbildung 6-18 wie folgt zusammen:

$$PE_{Y_{Schritt 1}} = [\sin(\alpha) * b] + R1 + [\sin(90^\circ - \alpha) * R1]$$

Formel 6-8

### Koordinaten Punkt PE Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“

x-Komponente:

Die x-Komponente von PE in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ergibt sich nach den Zusammenhängen aus Abbildung 6-19 und dem zuvor hergeleiteten Zusammenhang von  $\gamma$  wie folgt:

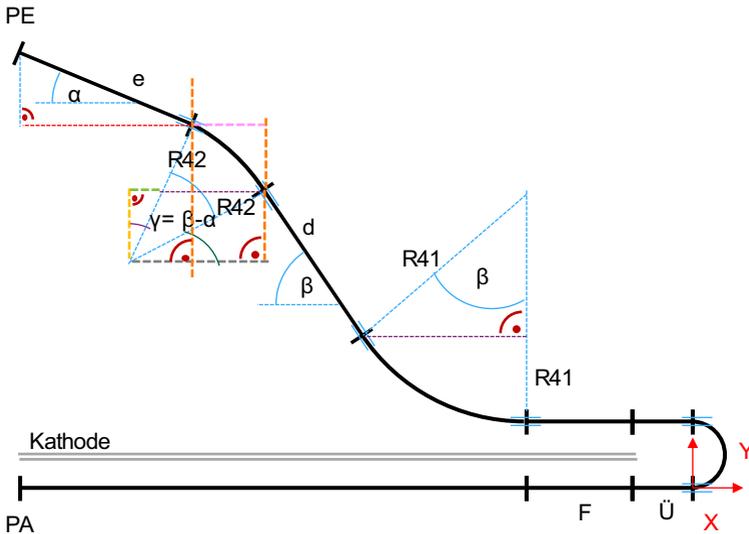


Abbildung 6-19 Zusammenhänge Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“

$$PE_{X_{Schritt 4}} = \ddot{U} + F + [\sin(\beta) * R41] + [\cos(\beta) * d] \\ + [[\cos(90^\circ - \beta) * R42] - [\cos(90^\circ - \alpha) * R42]] \\ + [\cos(\alpha) * e]$$

Formel 6-9

y-Komponente:

Für die y-Komponente von PE der neutralen Faser in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ gilt es zunächst, die Höhe der neutralen Faser der Anodenmaterialbahn auf dem Stapel zu errechnen. Diese ist unabhängig von der Intermittierungslückenbreite. Die minimale Intermittierungslückenbreite des Stapeldesigns ist in Abbildung 6-20 dargestellt:

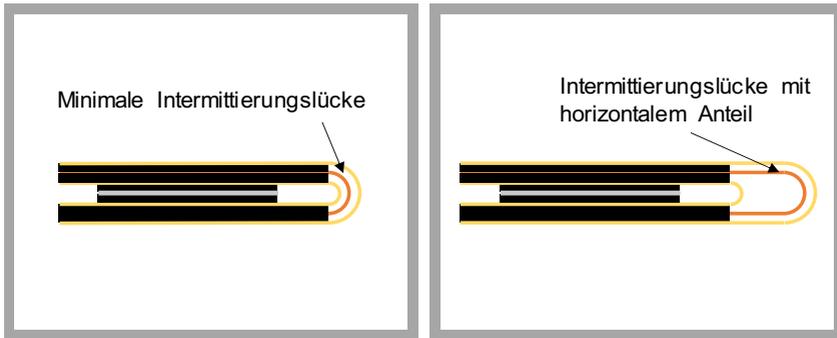


Abbildung 6-20 Intermittierungslückenbreiten

Minimale\_Intermittierungslückenbreite

Formel 6-10

$$= \left( \text{Kathodenträgerfoliedicke} + \text{Kathodenbeschichtungsdicke} + \text{Separatordicke} + \text{Anodenbeschichtungsdicke (einseitig)} + \frac{1}{2} * \text{Anodenträgerfoliedicke} \right) * \pi$$

Daraus ergibt sich die y-Höhe der neutralen Faser zwischen zwei Anodenbahnen auf dem Stapel zu:

$$2 * \frac{1}{2} \text{Anodendicke} + 2 * \text{Separatordicke} + 2 * \text{Kathodendicke}$$

Formel 6-11

Die Anodendicke und die Kathodendicke setzen sich jeweils aus der Dicke der Trägerfolie und der Gesamtbeschichtungsdicke zusammen. Gesamtbeschichtungsdicke bedeutet hierbei, dass die Beschichtungsdicken beider Seiten der Trägerfolie zu addieren

sind. Ist die Intermittierungslücke bei der Anodenmaterialbahn größer als die Minimale, ist eine U-Form der Anodenmaterialbahn im nicht beschichteten Bereich auszuführen, siehe Abbildung 6-20 rechts. Die x-Abschnitte im Fall, dass die Intermittierungslückenbreite größer ist als die Minimale, ergeben sich als:

$$x_{\text{Abschnitt}_{\text{Intbreite}}} = \frac{(\text{Intermittierungslückenbreite} - \text{Minimale}_{\text{Intermittierungslückenbreite}})}{2} \quad \text{Formel 6-12}$$

In die Längenberechnung der Materialbahn fließt die Intermittierungslückenbreite direkt ein, siehe Formel 6-6. Die y-Komponente ergibt sich mit den in Abbildung 6-19 dargestellten Zusammenhängen als:

$$PE_{Y_{\text{Schritt } 4}} = (\text{Anodenmaterialdicke} + 2 * \text{Separator dicke} + 2 * \text{Kathodendicke}) + [R41 - [\cos(\beta) * R41]] + [\sin(\beta) * d] + [[\sin(90^\circ - \alpha) * R42] - [\sin(90^\circ - \beta) * R42]] + [\sin(\alpha) * e] \quad \text{Formel 6-13}$$

Demnach setzen sich die sechs Größen Bahnlängen der Schritte 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ sowie x- und y-Koordinaten des Punktes PE der Schritte 1 und 4 aus 15 Parametern zusammen:

*Tabelle 6-1 Parameter der Bahnverläufe Schritt 1 und 4*

| Materialbahnverlaufparameter | Zelldesignparameter          |
|------------------------------|------------------------------|
| $\alpha$                     | Anodenmaterialdicke          |
| $\beta$                      | Separator dicke              |
| X1                           | Kathodendicke                |
| R1                           | Intermittierungslückenbreite |
| R41                          | Ü Überstand                  |
| R42                          | F Fixierfläche               |
| b                            |                              |
| d                            |                              |
| e                            |                              |

Diese Parameter können, wie in Tabelle 6-1 dargestellt, in zwei Kategorien unterteilt werden: Parameter, welche durch das Zelldesign sowie die Produktion vorgegeben werden, Zelldesignparameter, und Parameter, welche durch den Materialbahnverlauf bestimmt werden können, Materialbahnverlaufparameter. Der Parameter, der durch die

Produktion vorgegeben wird, ist die Fixierfläche  $F$ , auf dem Stapel. Demnach sind neun Parameter für den Materialbahnverlauf der Schritte 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ zu bestimmen. Hierfür stehen drei Bedingungen zu Verfügung, sodass sechs Parameter zu definieren sind. Daher werden zunächst die drei Bedingungen umgeformt. In Formel 6-2 werden Formel 6-7 und Formel 6-9 eingesetzt und anschließend nach  $X1$  umgeformt:

$$\begin{aligned} [\cos(\alpha) * b] - X1 - [\sin(\alpha) * R1] & & \text{Formel 6-14} \\ &= \ddot{U} + F + [\sin(\beta) * R41] + [\cos(\beta) * d] \\ &+ [[\cos(90^\circ - \beta) * R42] - [\cos(90^\circ - \alpha) * R42]] \\ &+ [\cos(\alpha) * e] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X1 = [\cos(\alpha) * b] - [\sin(\alpha) * R1] - \ddot{U} - F - [\sin(\beta) * R41] & & \text{Formel 6-15} \\ &- [\cos(\beta) * d] \\ &- [[\cos(90^\circ - \beta) * R42] - [\cos(90^\circ - \alpha) * R42]] \\ &- [\cos(\alpha) * e] \end{aligned}$$

In Formel 6-1 sind entsprechend Formel 6-4 und Formel 6-6 einzusetzen und nach  $b$  aufzulösen:

$$\begin{aligned} X1 + 2 * \pi * R1 * \left(\frac{180^\circ - \alpha}{360^\circ}\right) + b & & \text{Formel 6-16} \\ &= \text{Intermittierungslückenbreite} + \ddot{U} + F \\ &+ \left[\frac{\beta}{360^\circ} * (2 * \pi * R41)\right] + d + \left[\frac{\beta - \alpha}{360^\circ} * (2 * \pi * R42)\right] \\ &+ e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b = \text{Intermittierungslückenbreite} + \ddot{U} + F & & \text{Formel 6-17} \\ &+ \left[\frac{\beta}{360^\circ} * (2 * \pi * R41)\right] + d + \left[\frac{\beta - \alpha}{360^\circ} * (2 * \pi * R42)\right] \\ &+ e - X1 - 2 * \pi * R1 * \left(\frac{180^\circ - \alpha}{360^\circ}\right) \end{aligned}$$

Durch die Verwendung von Formel 6-15 in Formel 6-17 ergibt sich  $b$  zu:

$$\begin{aligned}
 b = & \left[ \text{Intermittierungslückenbreite} + \ddot{U} + F \right. && \text{Formel 6-18} \\
 & + \left[ \frac{\beta}{360^\circ} * (2 * \pi * R41) \right] + d + \left[ \frac{\beta - \alpha}{360^\circ} * (2 * \pi * R42) \right] \\
 & + e + [\sin(\alpha) * R1] + \ddot{U} + F + [\sin(\beta) * R41] \\
 & + [\cos(\beta) * d] \\
 & + [\cos(90^\circ - \beta) * R42] - [\cos(90^\circ - \alpha) * R42] \\
 & + [\cos(\alpha) * e] - 2 * \pi * R1 * \left( \frac{180^\circ - \alpha}{360^\circ} \right) \\
 & \left. / [1 + \cos(\alpha)] \right]
 \end{aligned}$$

Unter der Verwendung von Formel 6-8 und Formel 6-13 in Formel 6-3 ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 & [\sin(\alpha) * b] + R1 + [\sin(90^\circ - \alpha) * R1] && \text{Formel 6-19} \\
 & = (\text{Anodenmaterialdicke} + 2 * \text{Separatordicke} + 2 \\
 & * \text{Kathodendicke}) + [R41 - \cos(\beta) * R41] \\
 & + [\sin(\beta) * d] \\
 & + [[\sin(90^\circ - \alpha) * R42] - [\sin(90^\circ - \beta) * R42]] \\
 & + [\sin(\alpha) * e]
 \end{aligned}$$

Somit kann Formel 6-19 nach R1 aufgelöst werden. Unter der Verwendung von Formel 6-18 ergibt sich R1 zu:

$$\begin{aligned}
 R1 = & \left[ PE_{Y_{\text{Schritt 4}}} \right. && \text{Formel 6-20} \\
 & - [\sin(\alpha) * (\text{Bahnlänge}_{\text{Schritt 4}} + PE_{X_{\text{Schritt 4}}})] \\
 & \left. / [1 + \cos(\alpha)] \right] \\
 & / \left[ 1 \right. \\
 & + \sin(90^\circ - \alpha) \\
 & + \left. \left[ \sin(\alpha) * \sin(\alpha) - 2 * \pi * \sin(\alpha) * \left( \frac{180^\circ - \alpha}{360^\circ} \right) \right] \right] \\
 & \left. / [1 + \cos(\alpha)] \right]
 \end{aligned}$$

Somit können die drei Parameter X1 (Formel 6-15), b (Formel 6-18) und R1 (Formel 6-20) durch die verbleibenden sechs Materialbahnverlaufparameter und die Zelldesignparameter beschrieben werden. Die Zelldesignparameter sind Parameter, welche durch das Design des Stapels vorgegeben sind und daher nicht durch den Verfahrensablauf bestimmt werden. Der Verfahrensablauf ist so zu gestalten, dass der entsprechende Stapel mit den vorgegebenen Parametern realisiert wird. Da mehr unbekannte

Parameter (neun) als Gleichungen (drei) für die beiden Materialbahnverläufe vorliegen, ist das System unterbestimmt und es gilt, die sechs Materialbahnverlaufparameter zu bestimmen. Die Parameter sind hierbei so zu wählen, dass Formel 6-1, Formel 6-2 sowie Formel 6-3 erfüllt sind. Aufgrund der Tatsache, dass die zu verarbeitende kontinuierliche Materialbahn geringe Eigensteifigkeiten aufweist, ist die Bahnlänge minimal auszuführen. Da die nach Formel 6-1 definierte Bahnlänge die Länge des Materialbahnverlaufes zwischen zwei Bereichen ist, in denen die Materialbahn gesichert ist, gilt bei der Bestimmung der sechs Materialbahnverlaufparameter: *min (Bahnlänge)*.

Für die Lösung der vorliegenden Optimierungsaufgabe wird ein Genetischer Algorithmus (GA) verwendet. Genetische Algorithmen eignen sich im Besonderen bei kombinatorischen Optimierungsproblemen bzw. Parameteroptimierungen mit großen Parameterräumen (Papageorgiou & Leibold et al. 2015, S. 60). Im Folgenden werden die Grundzüge von genetischen Algorithmen vorgestellt, für eine detaillierte, weiterführende Erläuterung sei an dieser Stelle auf (Weicker 2015) verwiesen. Genetische Algorithmen sind der Klasse der Evolutionären Algorithmen zuzuordnen (Koch 2014, S. 59). Das Konzept der Genetischen Algorithmen imitiert den Evolutionsprozess der Natur. Die grundlegenden Ideen bei Genetischen Algorithmen beruhen auf der Arbeit von Holland (Holland 1975). Zunächst werden die Grundbegriffe der Genetischen Algorithmen eingeführt. Unter Individuum ist bei Genetischen Algorithmen eine Lösung des Optimierungsproblems zu verstehen. In Anlehnung an die biologische Evolution wird hierfür der Begriff Chromosom synonym verwendet. Ein Individuum bzw. Chromosom ist wiederum aus mehreren Genen aufgebaut. Jedes Gen enthält einen Wert, welcher als Allel bezeichnet wird (Koch 2014, S. 61), siehe Abbildung 6-21.

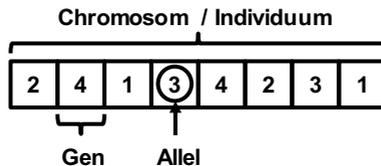


Abbildung 6-21 Begrifflichkeiten Genetischer Algorithmus nach (Koch 2014, S. 61)

Mehrere Individuen bilden eine Population. Der Ablauf eines Genetischen Algorithmus ist in Abbildung 6-22 dargestellt.

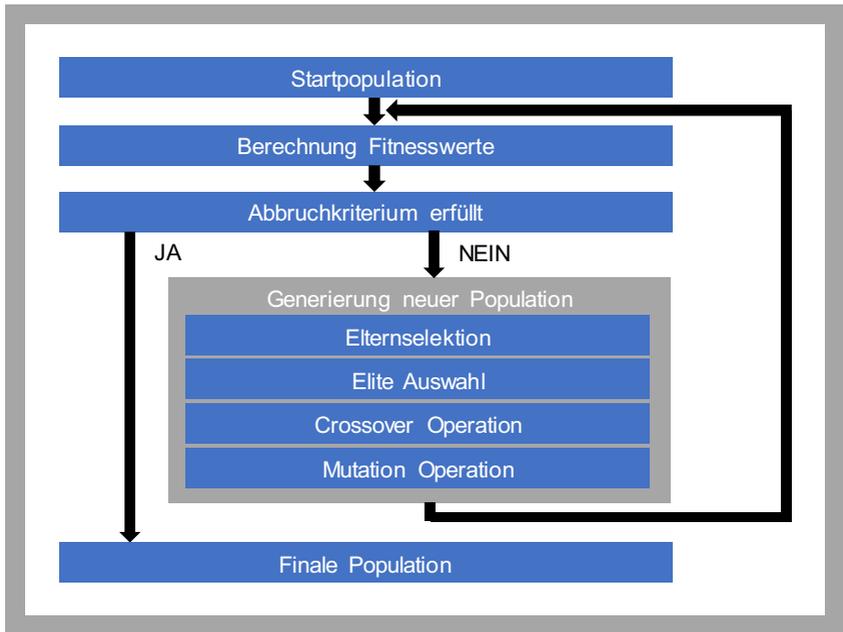


Abbildung 6-22 Ablaufplan eines Genetischen Algorithmus in Anlehnung an (Buttelmann & Lohmann 2004, S. 153)

Gemäß dem Ablaufplan eines Genetischen Algorithmus wird zu Beginn eine Startpopulation generiert. Die sogenannten Fitnesswerte der Individuen dieser Population werden anschließend berechnet. Der Fitnesswerte gibt die Güte eines Individuums an und wird daher zu Bewertung der Individuen verwendet (Buttelmann & Lohmann 2004, S. 151). Solange die definierten Abbruchkriterien nicht erfüllt sind, wird eine neue Population generiert und anschließend bewertet. Für die Erzeugung einer neuen Population und damit neuer Individuen werden verschiedene Operationen durchgeführt. Zunächst erfolgt eine auf den Fitnesswerten basierende Selektion der Individuen. Für die Selektion kann beispielsweise ein Stochastisches Universelles Sampling (SUS) oder eine rangbasierte Auswahl durchgeführt werden. Beim SUS ist die Auswahlwahrscheinlichkeit proportional zum Fitnesswert der Individuen. Damit kein Individuum zweimal selektiert werden kann, erfolgt die Auswahl der Individuen mit einem definierten Abstand. Bei

der rangbasierten Auswahl wird zur Selektion der Rang der Individuen bzgl. ihrer Fitness betrachtet. Beim Vorliegen einer Population mit wenigen Individuen mit sehr hohen Fitnesswerten würde die Vielfalt der Population bei der rangbasierten Auswahl länger aufrechterhalten bleiben als bei einer SUS-Auswahl, da bei der SUS diese wenigen Individuen sich aufgrund der sehr hohen Auswahlwahrscheinlichkeit durchsetzen würden. Basierend auf den ausgewählten Individuen erfolgt anschließend die Erzeugung bzw. je nach Variante des genetischen Algorithmus die Auswahl der Individuen für die neue Population. Bei elitistischen Varianten Genetischer Algorithmen werden die besten Individuen einer Population beibehalten und in die neue Population übernommen (Papageorgiou & Leibold et al. 2015, S. 62). Die Erzeugung neuer Individuen wird auf zwei Arten durchgeführt. Zum einen durch die Crossover Operation, auch Rekombination genannt, zum anderen durch die Mutation Operation. Die ausgewählten Individuen zur Erzeugung neuer Individuen werden Eltern genannt (Papageorgiou & Leibold et al. 2015, S. 63). Wesentlicher Unterschied der beiden Operationen ist, dass bei der Rekombination ganze Bereiche des Chromosoms ausgetauscht werden, bei der Mutation hingegen nur einzelne Gene verändert werden. Bei der Rekombination werden die Chromosomen der ausgewählten Eltern gekreuzt, sodass die Teile des Elternchromosoms vor bzw. nach dem Kreuzpunkt an das neue Individuum vererbt werden. Dies ist in Abbildung 6-23 anhand einer Rekombination mit einem Kreuzpunkt veranschaulicht. In Abhängigkeit der Variante des Genetischen Algorithmus können ein oder mehrere Kreuzpunkte bei der Rekombination eingesetzt werden (Papageorgiou & Leibold et al. 2015, S. 63).

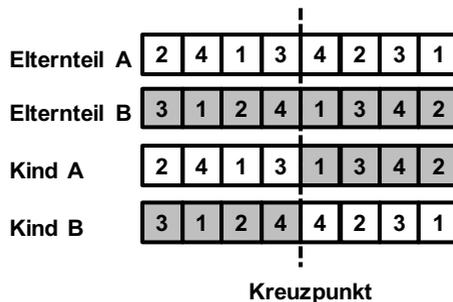


Abbildung 6-23 Rekombination mit einem Kreuzpunkt nach (Koch 2014, S. 80)

Eine weitere Möglichkeit zur Rekombination ist das sogenannte „Uniform Crossover“ (Koch 2014, S. 82). Hierbei wird zunächst ein zufälliger binärer Vektor generiert, sodass bei 1 das Gen von Elternteil A übernommen wird und bei 0 das Gen von Elternteil B, siehe Abbildung 6-24.

|                                |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <b>Elternteil A</b>            | 2 | 4 | 1 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 |
| <b>Elternteil B</b>            | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 4 | 2 | 3 |
| <b>Random crossover vector</b> | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| <b>Kind</b>                    | 1 | 4 | 1 | 4 | 1 | 2 | 2 | 1 |

Abbildung 6-24 Uniform Crossover

Bei der Mutation werden einzelne Gene der Individuen verändert. Dies kann auf unterschiedliche Arten durchgeführt werden. Zum einen können die einzelnen Gene der Individuen unabhängig zu den anderen Genen verändert werden, eine Variante dieser Mutationsart ist die Point Mutation. Zum anderen gibt es Mutationsvarianten, bei denen die Gene nicht unabhängig von den anderen Genen verändert werden, wie es beispielsweise bei der Swap Mutation durchgeführt wird. In Abbildung 6-25 sind die Point Mutation und die Swap Mutation dargestellt.

|                                    |                       |   |   |   |   |   |   |   |
|------------------------------------|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|
|                                    | <b>Point Mutation</b> |   |   |   |   |   |   |   |
| <b>Chromosom vor der Mutation</b>  | 2                     | 4 | 1 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 |
| <b>Chromosom nach der Mutation</b> | 2                     | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 |
|                                    | <b>SWAP Mutation</b>  |   |   |   |   |   |   |   |
| <b>Chromosom vor der Mutation</b>  | 2                     | 4 | 1 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 |
| <b>Chromosom nach der Mutation</b> | 2                     | 4 | 2 | 3 | 4 | 1 | 3 | 1 |

Abbildung 6-25 Mutation Operationen nach (Koch 2014, S. 85)

Die neue Population besteht demnach aus Individuen, welche elitistisch ausgewählt sowie durch Rekombination und Mutation erzeugt wurden. Diese Generierung neuer Populationen wird bis zur Erfüllung eines Abbruchkriteriums wiederholt. Abhängig von

der Gestaltung der Funktionen zur Auswahl, Rekombination und Mutation eignen sich Genetische Algorithmen für die Identifikation sowohl von globalen als auch lokalen Optima (Buttelmann & Lohmann 2004, S. 162).

Durch die Verwendung eines Genetischen Algorithmus können die beiden Materialbahnverläufe der Schritt 1 und 4 unter Einhaltung von Formel 6-1, Formel 6-2 und Formel 6-3 bestimmt werden, sodass die beiden Materialbahnlängen identisch sind und die Materialbahnlänge minimal ist. Zudem ist der Sicherungsbereich PE der beiden Schritte identisch. Die Definition der Materialbahnverläufe wird im Folgenden an einem konkreten Zellstapeldesign durchgeführt.

### **6.3 Zusammenfassung Entwicklung Verfahrensablauf**

In Kapitel 6 konnten zunächst für den Faltungsablauf die Prozessschritte definiert werden. Der konzipierte Materialbahnformungsablauf besteht aus fünf Prozessschritten. Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ ist eine werkzeuggebundene Formung gefolgt von einer Sicherung der Materialbahn in Schritt 2 „Materialbahn sichern“. Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ schafft die notwendige Zugänglichkeit des Arbeitsraumes, sodass in Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ eine zweite werkzeuggebundene Formung durchgeführt werden kann. Die dadurch erzielte Materialbahnposition wird abschließend in Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ gesichert. Für die einzelnen Schritte des Verfahrensablaufes wurden die Ziele und Randbedingungen aufgestellt. Hieraus wurde abgeleitet, dass für eine positionsgenaue Materialbahnablage identische Längen der Materialbahnverläufe von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ essenziell sind. Für die Erzielung der Längengleichheit wurden die Materialbahnverläufe der Prozessschritte daher parametrisiert und zu erfüllende Bedingungen abgeleitet. Neben den identischen Bahnlängen von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ müssen diese beiden Schritte auch einen Sicherungsbereich mit identischen Koordinaten aufweisen. Daher wurden die Zusammenhänge der Parameter der Schritte funktional aufgestellt. Aufgrund der kontinuierlichen Materialbahn mit geringer Eigensteifigkeit gilt es, die Materialbahnlänge minimal auszugestalten. Für die Lösung dieser Optimierungsaufgabe wurde ein Genetischer Algorithmus ausgewählt.

## 7 Validierung

In Kapitel 7 ist die zuvor im vorherigen Kapitel erläuterte Optimierung anhand eines konkreten Zellstapeldesigns durchzuführen und die Materialbahnverläufe zu errechnen. Aufbauend auf diesen errechneten Materialbahnverläufen gilt es, entsprechende Werkzeugkomponenten abzuleiten und auszugestalten, sodass sich die definierten Materialbahnverläufe einstellen. Hierfür werden zunächst die notwendigen Komponenten für den Materialbahnformungsablauf konzipiert. Anschließend werden die Maschinenkomponenten für die Materialbahnzuführung ausgehend vom Materialcoil bis zum Formungsablauf entworfen. Zur Überprüfung der Realisierbarkeit und der Funktionsfähigkeit des definierten Faltungsablaufes mit den ausgewählten Technologien ist es erforderlich, die dafür notwendigen Werkzeugkomponenten prototypisch umzusetzen. Daher erfolgt eine prototypische Realisierung der Materialbahnförderung und des Faltungsablaufs.

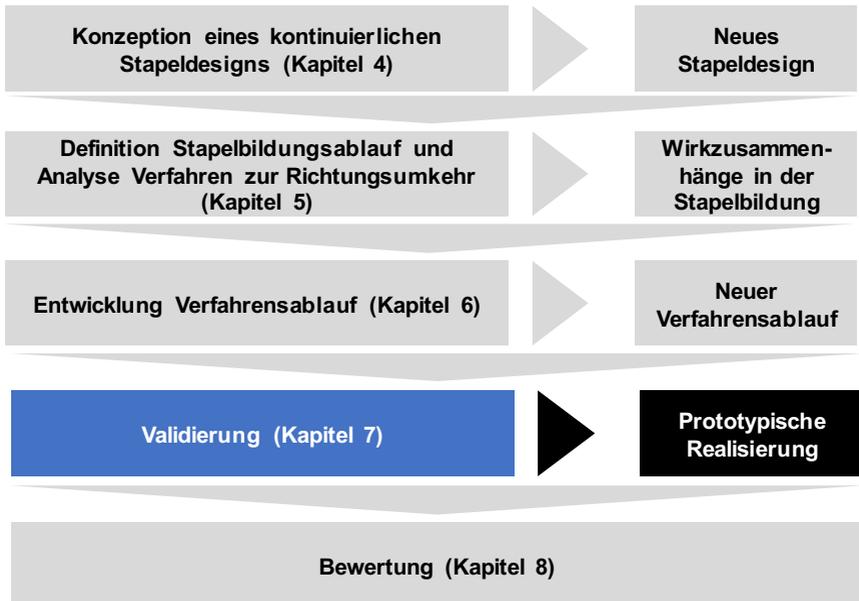


Abbildung 7-1 Vorgehensweise Kapitel 7

## 7.1 Vorliegendes Zellstapeldesign

Die zuvor definierten Zusammenhänge und Bedingungen der Materialbahnverläufe der Prozessschritte des konzipierten Faltungsablaufs werden nachfolgend an einem konkreten Zellstapeldesign angewandt. Die Abmessungen der Anodenbahn sind in Abbildung 7-2 abgebildet, es handelt sich hier um eine doppelseitig beschichtete Anodenmaterialbahn. Die Dicke der Kupferträgerfolie beträgt 0,01 mm.

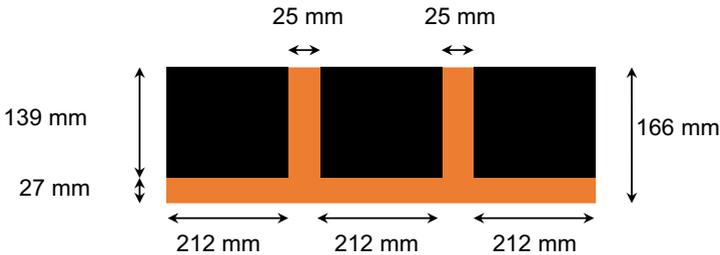


Abbildung 7-2 Abmessungen Anode

In Tabelle 7-1 sind die Werte der Zelldesignparameter ersichtlich. Die Dicke der einseitig beschichteten Aluminiumträgerfolie der Kathode beträgt 0,02 mm.

Tabelle 7-1 Zelldesignparameter

| Zelldesignparameter         | Wert     |
|-----------------------------|----------|
| Anodenmaterialdicke         | 0,11 mm  |
| Separatordicke              | 0,025 mm |
| Kathodendicke               | 0,07 mm  |
| Intermitterungslückenbreite | 25 mm    |
| Überstand Ü                 | 2 mm     |
| Fixierfläche F              | 15 mm    |

Gemäß Formel 6-11 ergibt sich eine y-Höhe der neutralen Faser zwischen zwei Anodenbahnen auf dem Stapel von 0,3 mm. Die vorliegende Intermitterungslückenbreite von 25 mm ist größer als die Minimale Intermitterungslückenbreite von 0,471 mm nach Formel 6-10. Daher bildet sich gemäß Abbildung 6-20 eine U-Form aus mit einem x-Abschnitt nach Formel 6-12 von 12,265 mm.

Die Berechnung und Optimierung der Materialbahnverläufe werden mit der Software MATLAB durchgeführt. Hierfür gilt es, mittels Genetischem Algorithmus die Materialbahnlänge zu minimieren mit Verwendung von Formel 6-15, Formel 6-18, Formel 6-20 zur Berechnung von  $X_1$ ,  $b$  und  $R_1$  und Einhaltung der Formel 6-1, Formel 6-2, Formel 6-3, der identischen Bahnlänge der Schritte 1 und 4 sowie einem identischen Punkt PE bei diesen Schritten. Damit ein globales Optimum identifiziert wird, wird zunächst eine zufällige Population mit einem random-Operator erzeugt. Diese zufällige Population wird als Startpopulation dem Genetischen Algorithmus übergeben. Damit sichergestellt werden kann, dass es sich beim ermittelten Optimum um ein globales Optimum handelt, muss dieses Vorgehen mehrmals wiederholt werden. Die Wertebereiche der sechs Materialbahnverlaufparameter, in welchen diese sowohl für die Startpopulation als auch während der Berechnungen des Genetischen Algorithmus variiert werden dürfen, sind in Tabelle 7-2 dargestellt.

*Tabelle 7-2 Wertebereich der Materialbahnverlaufparameter*

| Parameter | Untere Grenze | Obere Grenze |
|-----------|---------------|--------------|
| $\alpha$  | 0,1°          | 89°          |
| $\beta$   | 0,1°          | 89°          |
| R41       | 40 mm         | 200 mm       |
| R42       | 40 mm         | 200 mm       |
| d         | 0,1 mm        | 200 mm       |
| e         | 0,1 mm        | 200 mm       |

Für die Wertebereiche der Radien R41 und R42 wird eine untere Grenze von 40 mm festgelegt, dadurch soll eine materialschonende Verarbeitung gewährleistet werden. Für die derzeitige Herstellung der Materialbahncoils wird bei den Rolle-zu-Rolle-Verfahren der Beschichtung, Trocknung und Kalandrierung standardisiert ein 3" (= 76,2 mm) Coildurchmesser zur Materialbahnauf- und -abwicklung verwendet, sodass durch eine Verwendung von Radien  $\geq 40$  mm keine Beschädigungen der Materialbahn bei der Verarbeitung der Stapelbildung hervorgerufen werden sollten. Da diese untere Grenze ebenso für Radius R1 zu realisieren ist, leitet sich die Nebenbedingung von:

$$R_1 \geq 40 \text{ mm} \quad \text{Formel 7-1}$$

für die Optimierung ab. Eine weitere Nebenbedingung ist:

$$X_1 \geq 0 \quad \text{Formel 7-2}$$

da gemäß Abbildung 6-18 bei einem negativen  $X_1$ -Wert die bereits abgelegte Materialbahn verändert werden würde, was zu es vermeiden gilt. Der verwendete Genetische Algorithmus führt eine rangbasierte Selektion der Eltern aus. Anschließend erfolgt eine elitistische Auswahl von 5 % der Populationsgröße. Die Rekombination wird mittels Uniform Crossover durchgeführt und umfasst 80 % der Population. Die Mutation, deren Anteil an der Population 15 % umfasst, wird durch eine Point-Mutation unter Berücksichtigung der zulässigen Wertebereiche und basierend auf Erfahrungswerten der vorherigen Generationen durchgeführt. Als Stoppkriterium sind unter anderem eine maximale Generationenanzahl (600) und eine durchschnittliche Änderung des Fitnesswerte über die letzten 50 Generationen von unter 0,0001 implementiert. In Abbildung 7-3 ist der Verlauf der Fitnessfunktionswerte der Genetischen Algorithmen dargestellt. Der Funktionswert ist die zu minimierende Materialbahnlänge, welche im Optimum 232,504 mm aufweist.

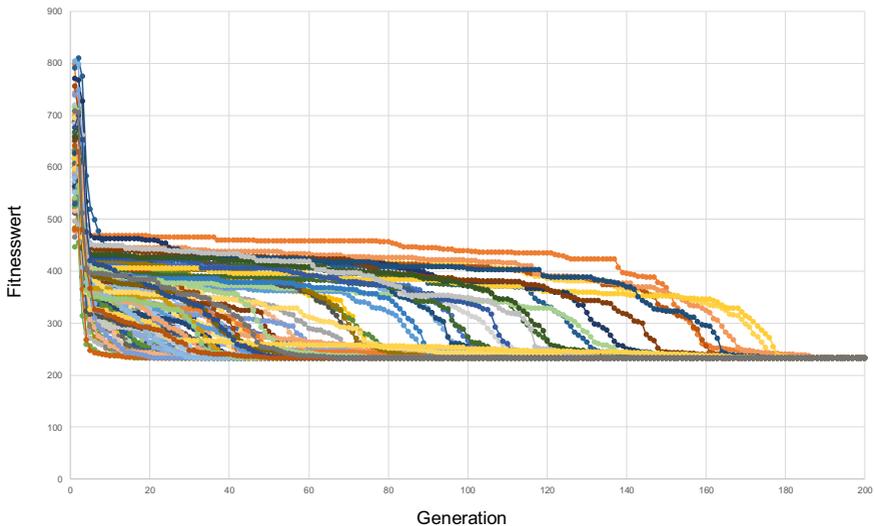


Abbildung 7-3 Verlauf Optimierung mittels GA

*Tabelle 7-3 Optimierte Materialbahnverlaufparameter*

| Parameter                      | Wert       |
|--------------------------------|------------|
| $\alpha$                       | 44,17°     |
| $\beta$                        | 89,0°      |
| R41                            | 40,0 mm    |
| R42                            | 40,0 mm    |
| d                              | 96,973 mm  |
| e                              | 0,1 mm     |
| X1                             | 0,0 mm     |
| R1                             | 40,0 mm    |
| b                              | 137,676 mm |
| Materialbahnlänge Schritt 1, 4 | 232,504 mm |
| PE <sub>y</sub> Schritt 1, 4   | 164,622 mm |
| PE <sub>x</sub> Schritt 1, 4   | 70,88 mm   |

Die optimierten Parameterwerte sind in Tabelle 7-3 dargestellt. Durch die mittels Genetischem Algorithmus optimierten Parameter ergeben sich die in Abbildung 7-4 dargestellten Materialbahnverläufe der Prozessschritte 1 und 4.

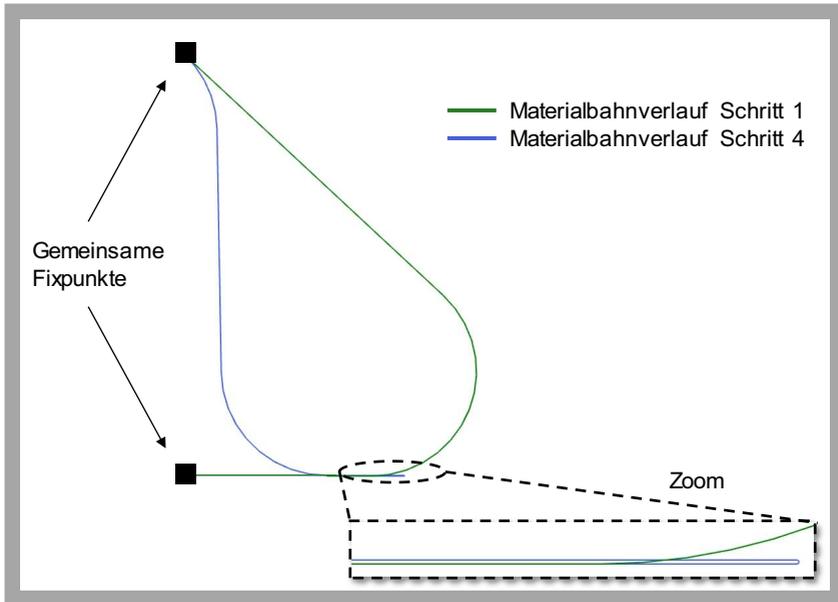


Abbildung 7-4 Optimierte Materialbahnverläufe der Schritte 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“

Damit sich die definierten Materialbahnverläufe der fünf Schritte des Materialformungsablaufes einstellen, gilt es nun, entsprechende Werkzeugkomponenten zu konzipieren. Zunächst werden die notwendigen Komponenten für den Materialbahnformungsablauf abgeleitet und ausgestaltet. Anschließend werden die Komponenten für die Materialbahnzuführung ausgehend vom Materialcoil bis zum Formungsablauf entworfen.

## 7.2 Konzeptionierung Faltungskomponenten

Für die Konzeptionierung der benötigten Komponenten zur Realisierung der definierten Materialbahnverläufe werden zuerst die Positionen definiert, an welchen Komponenten benötigt werden. Zur Realisierung dieser werden darauf aufbauend geeignete Technologien ausgewählt, welche anschließend konkretisiert und ausgestaltet werden.

### 7.2.1 Ableitung Stützstellen/Komponentenpositionen/-bereiche

Komponenten beim Materialbahnformungsablauf werden für die Erfüllung von drei Aufgaben benötigt: die Sicherung der Materialbahn, das Bewegen der Materialbahn und

zur werkzeuggebundenen Formung die Definition des Materialbahnverlaufs durch die Werkzeugkontur, an welche sich die Materialbahn anlegt. Daher werden im Folgenden die einzelnen Schritte der Materialbahnformung diskutiert und die notwendigen Arten von Komponenten definiert.

### Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“:

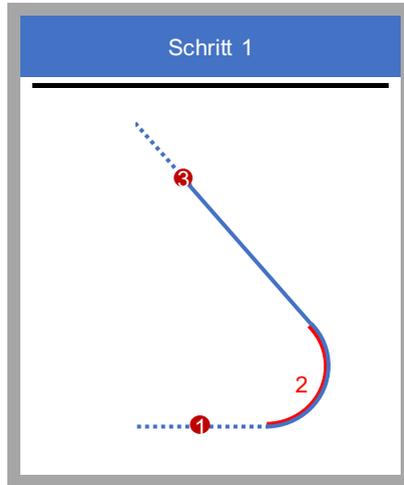


Abbildung 7-5 Komponentenposition Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“

Für die werkzeuggebundene Formung in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ muss zunächst die Materialbahn in ihrer Position gesichert werden. Diese **Sicherung** ist an **Position 1**, welche in Abbildung 7-5 ersichtlich ist, durchzuführen, damit die bereits auf dem Stapel abgelegte Bahn nicht in ihrer Position verändert wird. Dies wurde zuvor in Kapitel 6 als unterer Sicherungsbereich hergeleitet. Die **Werkzeugkontur**, an welche sich die Materialbahn bei der Formung anlegen soll, ist in dem Bereich auszuführen, in welchem der definierte Materialbahnverlauf nicht linear ist, dies ist an **Position 2** in Abbildung 7-5 dargestellt. Damit sich die Materialbahn an die Werkzeugkontur anlegt, ist die Materialbahn entsprechend zu bewegen, das **Bewegen** ist so auszuführen, dass die Materialbahn entsprechend dem in Kapitel 6 definierten Ablauf in Schritt 2 „Materialbahn sichern“ fixiert werden kann, dies erfolgt entsprechend an **Position 3**.

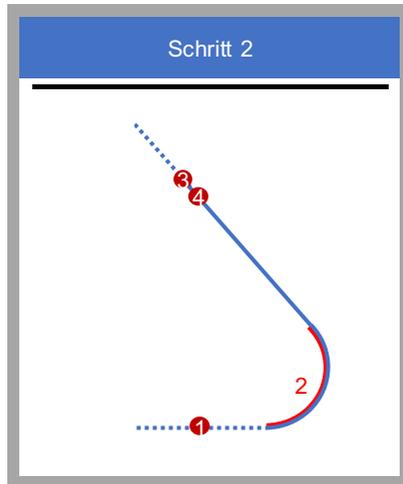
**Schritt 2 „Materialbahn sichern“:**

Abbildung 7-6 Komponentenpositionen Schritt 2 „Materialbahn sichern“

Für die Sicherung der Materialbahn in Schritt 2 „Materialbahn sichern“ gilt es, die durch Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ hergestellte Materialbahnposition nicht zu verändern, daher werden die Komponentenpositionen 1 und 2 beibehalten. Die **Sicherung** der Materialbahn erfolgt in **Position 4**, dies ist in Abbildung 7-6 abgebildet. Diese, in Kapitel 6 als oberer Sicherungsbereich definierte Materialbahnsicherung erfolgt so, dass sich die Bewegungskomponenten (Position 3) nicht zwischen den beiden Sicherungsbereichen befinden.

**Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“:**

Bei Schritt 3 „Zugänglichkeit schaffen“ wird keine Komponente eingebracht. Zur Schaffung der Zugänglichkeit für die Materialbahnablage muss die Werkzeugkontur in Position 2 aus Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ aus dem Arbeitsraum entfernt werden.

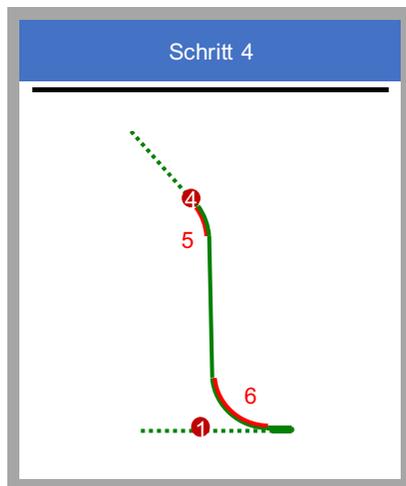
**Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“:**

Abbildung 7-7 Komponentenpositionen Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“

In Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ bestehen die beiden Sicherungen der Materialbahn in Position 1 und Position 4 weiterhin, sodass zwischen diesen die Materialbahn entsprechend im definierten Verlauf positioniert werden kann. Für die werkzeuggebundene Formung der beiden Materialbahnkrümmungsbereiche werden Werkzeugkonturen, welche durch das Anlegen der Materialbahn an diese den Bahnverlauf definieren, benötigt. Daher wird in **Position 5** eine **Werkzeugkontur** benötigt. Zudem muss die Materialbahn an diese Werkzeugkontur durch **Bewegen** angelegt werden. Dies gilt ebenso für **Position 6**, auch hier wird eine **Werkzeugkontur** für die Vorgabe der Bahnposition benötigt und das entsprechende **Bewegen** der Materialbahn an die Kontur.

**Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“:**

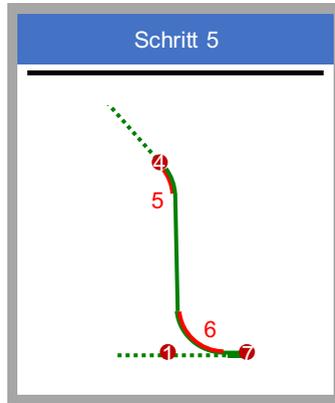


Abbildung 7-8 Komponentenposition Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“

Für die Sicherung der Materialbahn in der abgelegten Position auf dem (Teil-)Stapel in Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ wird eine **Sicherung** in **Position 7** benötigt.

| Komponentenbereiche | Schritt 1 | Schritt 2 | Schritt 3 | Schritt 4 | Schritt 5 | Ende  |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| Position 1          | Aktiv     | Aktiv     | Aktiv     | Aktiv     | Aktiv     |       |
| Position 2          | Aktiv     | Aktiv     |           |           |           |       |
| Position 3          | Aktiv     |           |           |           |           | Aktiv |
| Position 4          |           | Aktiv     | Aktiv     | Aktiv     | Aktiv     |       |
| Position 5          |           |           |           | Aktiv     | Aktiv     |       |
| Position 6          |           |           |           | Aktiv     | Aktiv     |       |
| Position 7          |           |           |           |           | Aktiv     | Aktiv |

Abbildung 7-9 Aktivität der Komponenten während des Prozessablaufs

Die sich daraus ergebenden aktiven Komponentenbereiche über den Prozessablauf der fünf Schritte sind in Abbildung 7-9 dargestellt. Für die Umsetzung der Funktionen

in den abgeleiteten Bereichen gilt es, geeignete Technologien zu identifizieren. Daher werden nachfolgend verschiedene Technologien diskutiert und ausgewählt.

### **7.2.2 Technologieauswahl**

Für das Sichern und das Bewegen der Materialbahn werden potenzielle Technologien diskutiert. Bewegen der Materialbahn bedeutet in diesem Zusammenhang ebenfalls das Anlegen der Materialbahn an die Werkzeugkontur. Die Werkzeugkontur als solches ist entsprechend in den Materialbahnverlauf einzubringen, bedarf allerdings keiner Technologieauswahl.

#### **Sichern der Materialbahn**

Das Sichern ist in Position 1 in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ einzubringen und bis Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ aufrechtzuerhalten. Ebenfalls bis Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ ist das Sichern in Position 4, welches in Schritt 2 „Materialbahn sichern“ eingebracht wird, zu realisieren und das Sichern in Position 7 für Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ und nachfolgende Prozesse einzubringen. Das Sichern gemäß (VDI 2860:1990-05, S. 6) kann durch die Wirkprinzipien des Kraftschlusses, Stoffschlusses und Formschlusses realisiert werden. Das Sichern kann in die Elementarfunktionen Halten und Lösen eingeteilt werden, wobei Halten *das vorübergehende Sichern eines Körpers in einer bestimmten Orientierung und Position ist* (VDI 2860:1990-05, S. 6). Erfolgt dieses vorübergehende Sichern unter Beteiligung von Kraftschluss, ist es als abgeleitete Funktion Spannen definiert. Lösen ist die Umkehrung des Haltens und das Entspannen die Umkehrung des Spannens (VDI 2860:1990-05, S. 6).

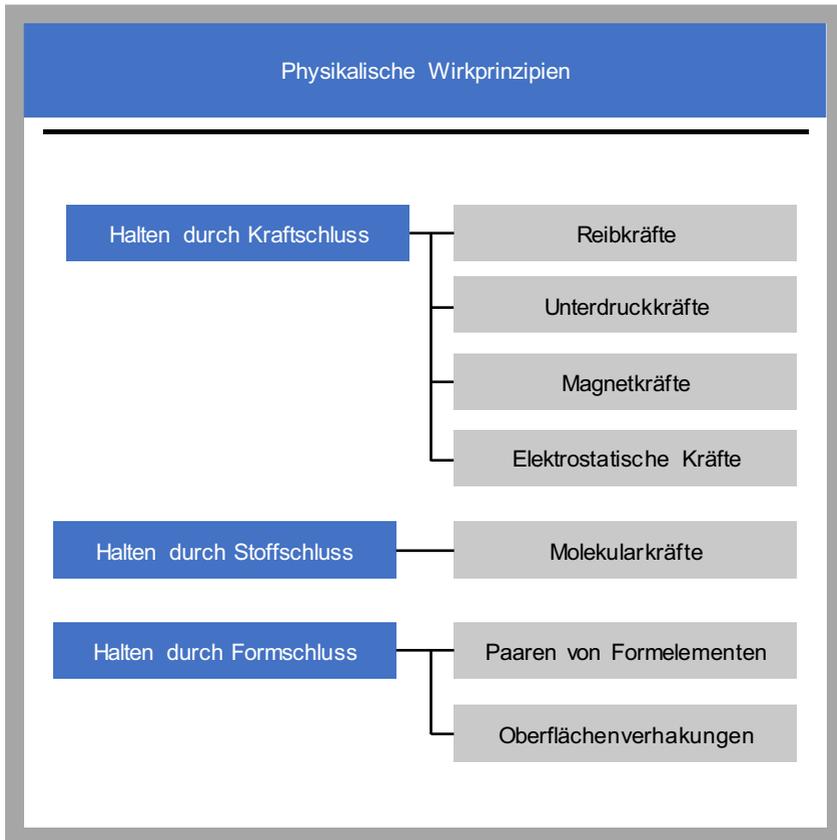
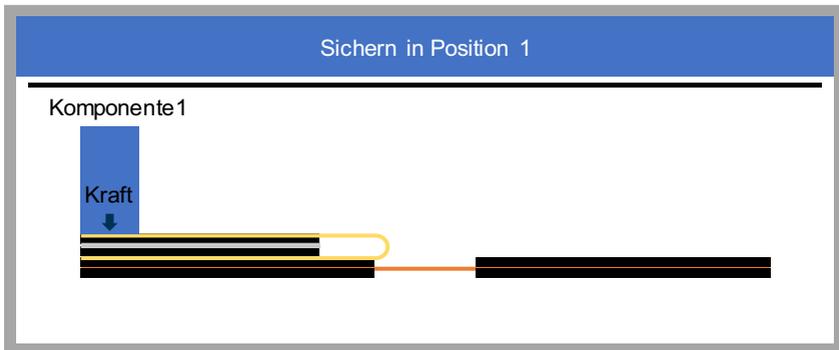


Abbildung 7-10 Physikalische Wirkprinzipien nach (Hesse 2012, S. 10)

Oftmals werden auch Kombinationen der Wirkprinzipien eingesetzt, die physikalischen Wirkprinzipien des Haltens sind in Abbildung 7-10 dargestellt. Für die Anwendung in der Stapelbildung wird das Halten durch Stoffschluss aufgrund der Beanspruchung der Materialbahn und der Gefahr von Rückständen durch Fremdpartikeln nach dem Sichern nicht weiterverfolgt. Beispiele von stoffschlüssigen Lösungen sind Klebeband und Gefriergreifer. Halten durch Formschluss basierend auf Oberflächenverhakungen ist ebenfalls ungeeignet. Aufgrund der vorliegenden Materialbahnverläufe, welche in

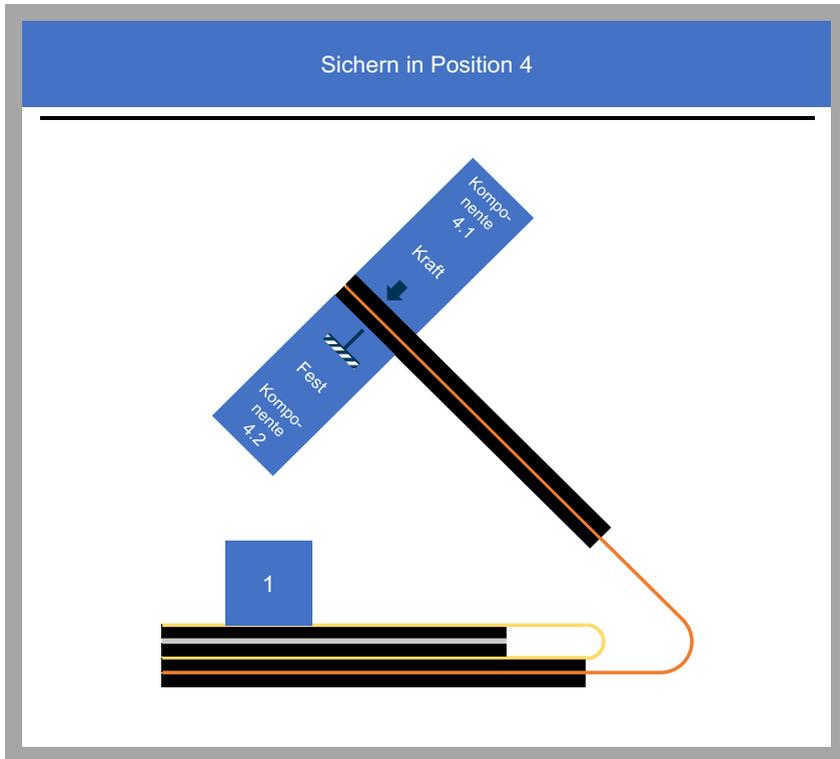
den Sicherungsbereichen Geraden aufweisen, wird Paaren von Formelementen als Lösung des Sicherns nicht weiterverfolgt. Die Vertreter Elektrostatische Kräfte, Magnetkräfte und Unterdruckkräfte des Haltens durch Kraftschluss werden aufgrund ihres Einflusses bzw. geringen Haltekraft nicht detaillierter betrachtet. Daher wird das Halten durch Kraftschluss mit Reibkräften weiterverfolgt. Zur Realisierung des Sicherns durch Reibkräfte gilt es, eine Normalkraft auf die Materialbahn aufzubringen. Damit dadurch die Materialbahnposition nicht verschoben wird, wird eine Komponente auf der gegenüberliegenden Seite der Materialbahn benötigt. Daher werden die drei Anwendungspositionen einzeln betrachtet.

### *Sichern in Position 1*

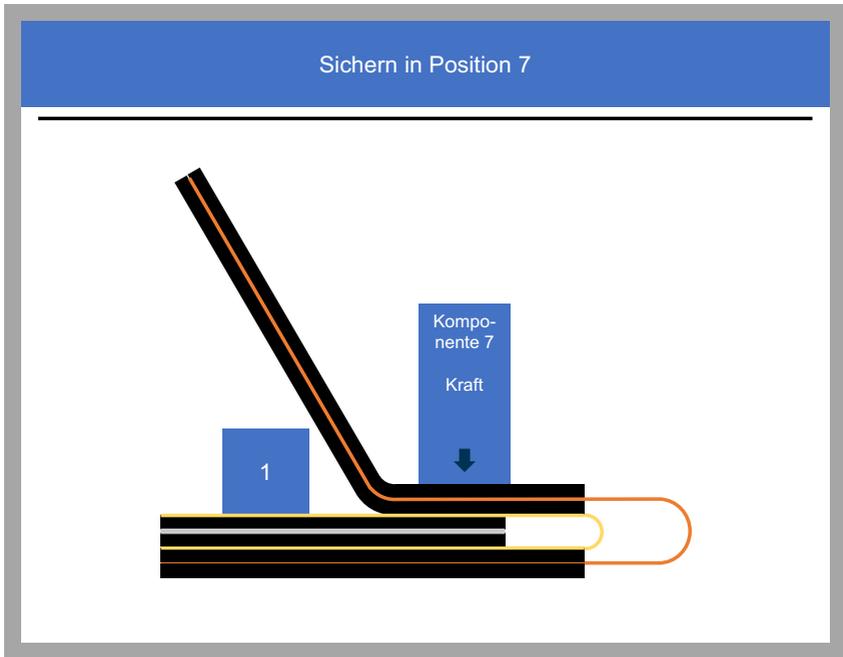


*Abbildung 7-11 Sichern Position 1*

Bei Position 1 ist die zu sichernde Materialbahn bereits auf dem Stapel positioniert. Da der gebildete (Teil-)Stapel in negative y-Richtung keinen Freiheitsgrad aufweist und der Stapel im Sicherungsbereich keine Hohlräume hat, siehe Abbildung 7-11, ist eine Komponente für das Sichern ausreichend. Diese Komponente bringt die notwendige Normalkraft mit entsprechendem Reibwert auf die Materialbahn auf, sodass diese in ihrer Position gesichert wird.

*Sichern in Position 4**Abbildung 7-12 Sichern Position 4*

In Position 4 werden im Gegensatz zu Position 1 für das Sichern durch Reibkraft zwei Komponenten benötigt, zwischen welche die Materialbahn eingeklemmt wird. Diese Komponenten sind so anzuordnen, dass die Materialbahnposition keine Änderung erfährt. Daher werden diese direkt gegenüberliegend angeordnet, siehe Abbildung 7-12.

*Sichern in Position 7**Abbildung 7-13 Sichern Position 7*

Für das Sichern der Materialbahn in Position 7 kann analog zu Position 1 aufgrund des bereits gebildeten (Teil-)Stapels nur eine Komponente eingesetzt werden. Im Gegensatz zu Position 1 weist der Stapel in Position 7 allerdings Hohlräume auf. Diese sind durch die unterschiedlichen Abmessungen der Beschichtungsflächen der Anode und Kathode begründet. Daher ist in Position 7 darauf zu achten, dass nur in Bereichen ohne Hohlräume Kraft auf den Stapel ausgeübt wird, siehe Abbildung 7-13.

**Bewegen der Materialbahn**

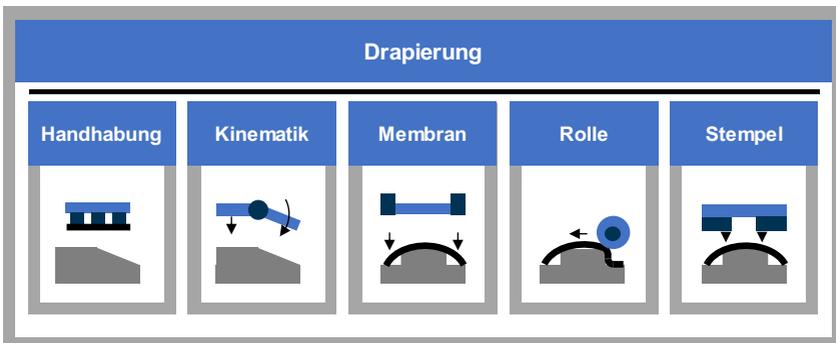
Das Bewegen der Materialbahn ist bei zwei Schritten durchzuführen: Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“.

### *Bewegen Position 3*

Das Bewegen der Materialbahn in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ wird durch Bewegung der gesamten Materialbahn erzeugt, daher ist diese Bewegung im Rahmen der Materialbahnzuführung in Kapitel 7.2 zu betrachten. Diese ist so zu gestalten, dass sich die Materialbahn in Position 2 an die Werkzeugkontur anlegt und sich der definierte Materialbahnverlauf bis zu Position 3 einstellt.

### *Bewegen Position 5 und 6*

Das Bewegen der Materialbahn in den Positionen 5 und 6 bei Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ wird gemeinsam betrachtet, da dieselben Randbedingungen vorliegen. Bei Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ ist die Materialbahn durch die Positionen 1 und 4 gesichert und ist, wie zuvor abgeleitet, ausgehend von Position 4 an die Werkzeugkontur angelegt, sodass sich der definierte Materialbahnverlauf ergibt. Eine solche Formgebung eines zweidimensionalen Werkstücks an eine dreidimensionale Geometrie, Drapierung, wird ebenfalls bei der Verarbeitung von textilen Halbzeugen umgesetzt (Nosrat Nezami & Gereke et al. 2014, S. 4). Aus diesem Grund werden die Mechanismen der Drapierung von textilen Halbzeugen auf ihre Eignung für das Anlegen der Materialbahn in den Positionen 5 und 6 diskutiert.



*Abbildung 7-14 Mechanismen der Drapierung nach (Wagner 2015, S. 22)*

Die verwendeten Mechanismen der Drapierung von textilen Halbzeugen können gemäß Abbildung 7-14 in fünf Kategorien eingeteilt werden. Die Kategorie Handhabung unterteilt sich in elastische und kinematische Greifer. Die Aufnahme und Positionierung des Halbzeuges erfolgt dabei durch Greifelemente. Das Drapieren erfolgt entweder

durch die Greifelemente direkt, wenn diese elastisch gelagert sind, oder durch integrierte elastische Elemente in den Greifflächen (Wagner 2015, S. 23). Für größere Umformgrade sind kinematische Einheiten in die Greifsysteme implementiert (Wagner 2015, S. 22). Kinematisches Drapieren erfolgt mittels stationärer Vorrichtungen, welche durch ihre Bewegungen die Formgebung realisieren (Spieler & Helbig 2011, S. 5).

Bei der Drapierung mittels Membran wird eine Membran über die Werkzeugkontur und das umzuformende Werkstück gelegt. Durch das Erzeugen von Vakuum und der dadurch resultierenden Druckdifferenz zwischen Umgebung und Membranbereich erfolgt die Drapierung (Wagner 2015, S. 26). Das Drapieren durch einen Rollenmechanismus erfolgt beispielsweise durch eine zylinderförmige Vorrichtung mit einer Schaumstoffummantelung (Ehinger & Reinhart 2014, S. 561), mit welcher die Werkzeugkontur abgefahren und das Halbzeug dadurch ausgestrichen wird. Drapierlösungen mit Stempelmechanismen bestehen häufig aus Unter- und Oberwerkzeug, welche durch Zylinder verfahren werden können. Für komplexere Verformungen werden segmentierte Stempelwerkzeuge eingesetzt, welche in einer definierten Reihenfolge eingesetzt werden, sodass sich das Material an die Werkzeugkontur anlegt (Graf 2012, S. 6).

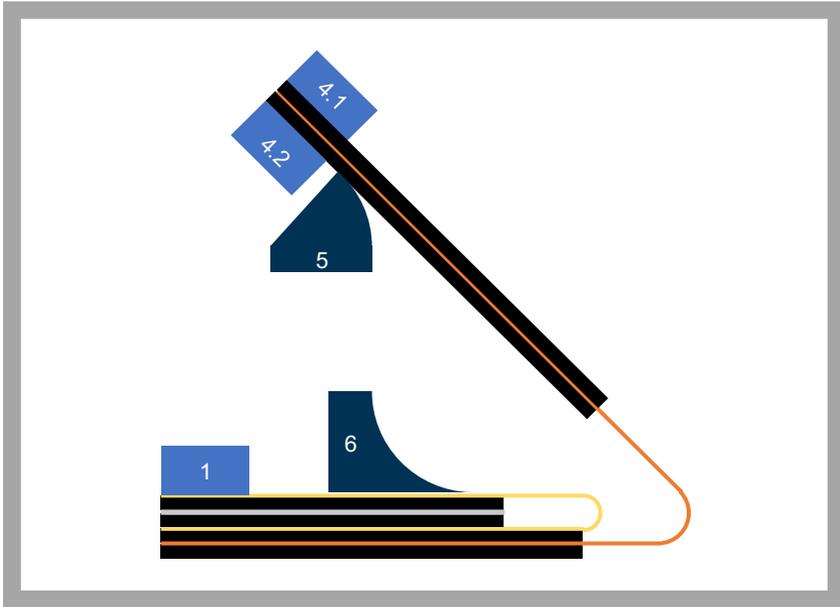


Abbildung 7-15 Bewegen Positionen 5 und 6

Die auszuwählende Technologie hat die Aufgabe, die Materialbahn in den Positionen 5 und 6 an die Werkzeugkontur anzulegen, siehe Abbildung 7-15. Die Werkzeugkonturen befinden sich in negativer x-Richtung der Materialbahn, da in Bereich 6 die Kontur auf dem bereits gebildeten (Teil-)Stapel zu platzieren ist. Andernfalls kann die Materialbahn nicht in ihre Sollposition überführt und direkt auf dem Stapel fixiert werden. Damit das Anlegen der Materialbahn an die Werkzeugkonturen aus einer Richtung und Seite der Materialbahn erfolgen kann, wird die Werkzeugkontur in Bereich 5 ebenfalls in negativer x-Richtung der Materialbahn platziert. Entscheidend beim Anlegen der Materialbahn an die Werkzeugkonturen ist, dass dies ausgehend von Position 4 erfolgt, sodass sich die definierte Materialbahnposition in Bereich von Position 7 und der Intermittierungslücke aufgrund der errechneten Materialbahnlänge einstellt. Dies bedeutet, dass das Anlegen nicht gleichzeitig an der gesamten Kontur erfolgen darf, sondern

ausgehend von Position 4 entlang des Materialbahnverlaufes. Daher werden die verschiedenen Mechanismen anhand ihrer Eignung hinsichtlich materialschonender Verarbeitung, Ablegeablauf und Fixierbarkeit der Materialbahn in Position 7 bewertet.

| Charakteristikum                | Handhabung  | Kinematik   | Membran   | Rolle   | Stempel   |
|---------------------------------|---|---|---|---|---|
| Material-schonende Verarbeitung |  |  |  |  |  |
| Ablegeverhalten                 |  |  |  |  |  |
| Fixierung Position 7            |  |  |  |  |  |

 Erfüllt Anforderung nicht     Erfüllt Anforderung vollständig

Abbildung 7-16 Bewertung Mechanismen für Positionen 5 und 6

Für eine materialschonende Verarbeitung bei einer Rollenlösung sollte der Rollenradius mindestens 40 mm betragen, aufgrund dieses Radius ist eine Fixierung in Position 7 durch die dadurch eingeschränkte Zugänglichkeit zum Klemmbereich nur schwer realisierbar. Bei einer Membranlösung ist das Ablegeverhalten, welches ausgehend von Position 4 hin zu Position 7 erfolgen soll, nur erschwert umsetzbar: es müssten beispielsweise unterschiedliche Kammern verwendet werden, welche nacheinander die Materialbahn stückweise an die Konturen anlegen. Eine Fixierung in Position 7 ist durch den benötigten Bauraum und die dadurch eingeschränkte Zugänglichkeit nur erschwert durchführbar. Bei Handhabungslösungen ist die Beanspruchung durch die Greifelemente nachteilig zu bewerten, bei den kinematischen Lösungen werden die Anforderungen an das Ablegeverhalten nicht ausreichend erfüllt. Daher wird eine Stempelösung für das Anlegen der Materialbahn an die Werkzeugkonturen in den Positionen 5 und 6 weiterverfolgt. Damit ein Anlegeverhalten entsteht, welches die Materialbahn beginnend von Position 4 hin zu Position 7 anlegt, ohne dass die gesamte Kontur auf einmal anlegt wird, ist ein Ablauf mit mehreren Stempeln zu erarbeiten. Zur Unterstützung der Realisierung des errechneten Materialbahnverlaufs ist im Materialbahnverlaufsbereich zwischen den Positionen 5 und 6 ebenfalls eine Werkzeugkontur einzubringen, an welche die Materialbahn angelegt werden kann.

### **7.2.3 Konzeption Komponenten**

Basierend auf den zuvor definierten Schritten und ausgewählten Technologien gilt es Komponenten auszugestalten, sodass der Materialformungsablauf mit den errechneten Materialbahnverläufen realisiert werden kann. Durch die zuvor ausgewählten Technologien des Haltens durch Kraftschluss mittels Reibkraft und den Stempellösungen zum Bewegen der Materialbahn sowie den notwendigen Werkzeugkonturen zum Anlegen der Materialbahn ergibt sich der Bedarf an den in Abbildung 7-17 schematisch dargestellten Komponenten.

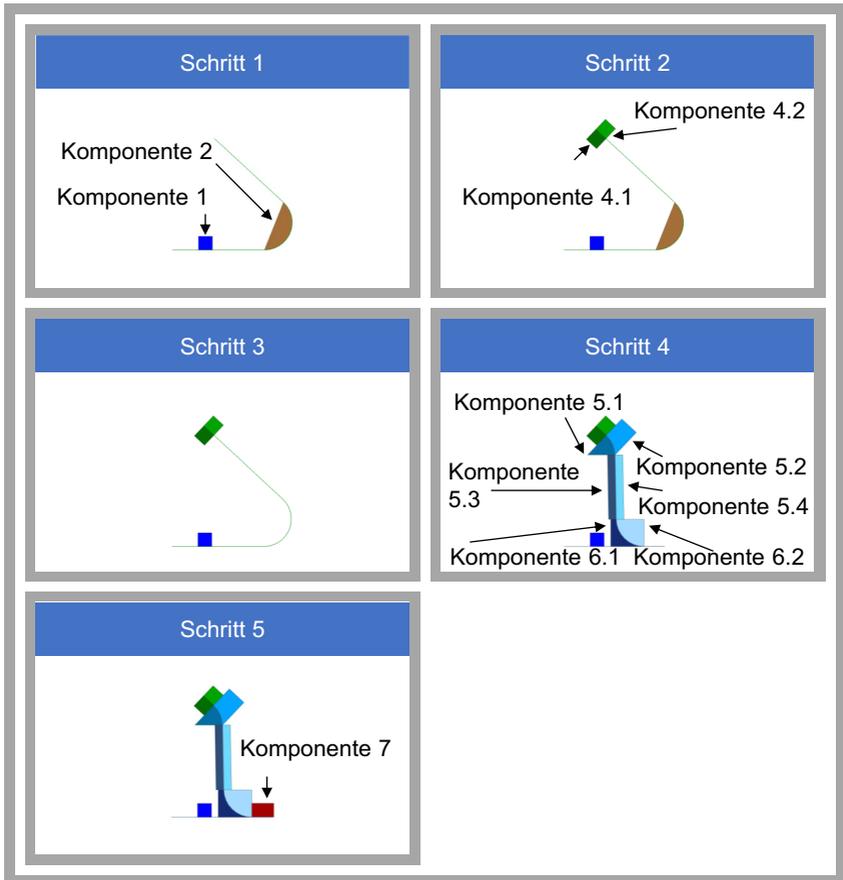


Abbildung 7-17 Komponenten über den gesamten Schrittverlauf

Die Komponenten werden hinsichtlich möglicher Verweildauer sowie Ein- und Ausbringungsrichtungen betrachtet und gegebenenfalls zusammengefasst, sodass eine Reduktion der Anzahl der Komponenten erzielt werden kann.

| Komponente     | Schritt 1 | Schritt 2 | Schritt 3 | Schritt 4 | Schritt 5 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Komponente 1   | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 2   | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 4.1 | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 4.2 | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 5.1 | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 5.2 | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 5.3 | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 5.4 | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 6.1 | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 6.2 | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |
| Komponente 7   | ■         | ■         | ■         | ■         | ■         |

- = Aktiv
- = Möglichkeit des Verbleibs gegeben
- = Möglichkeit des Verbleibs nicht gegeben

*Abbildung 7-18 Mögliche Verweildauer der Komponenten*

In Abbildung 7-18 sind die Komponenten mit ihrem Status beim jeweiligen Schritt aufgetragen. Hierbei wird unterschieden zwischen Aktiv, wenn die zugeordnete Funktion der Komponente für den Schrittablauf notwendig ist, der Möglichkeit, dass die Komponente in ihrer Position beim Schritt verbleiben kann, ohne dass die Komponente für den Schrittablauf benötigt wird, und der Situation, dass diese Möglichkeit des Verbleibs nicht gegeben ist, da aufgrund der Position der Komponente der Schrittablauf nicht durchführbar wäre. Die Komponenten 1, 2, 4.1, 5.1, 5.3 und 6.1 sind in negativer x-Richtung von der Materialbahn anzuordnen und dementsprechend ein- und auszubringen. Für alle anderen Komponenten gilt dies in positiver x-Richtung von der Materialbahn. Basierend auf Abbildung 7-18 und den Restriktionen der Ein- und Ausbringung

in Bezug zur Materialbahn werden nachfolgend Konzepte für die Handhabungsabläufe zum Ein- und Ausbringen der Komponenten sowie ein Zusammenfassen dieser erarbeitet.

**Konzept 1:**

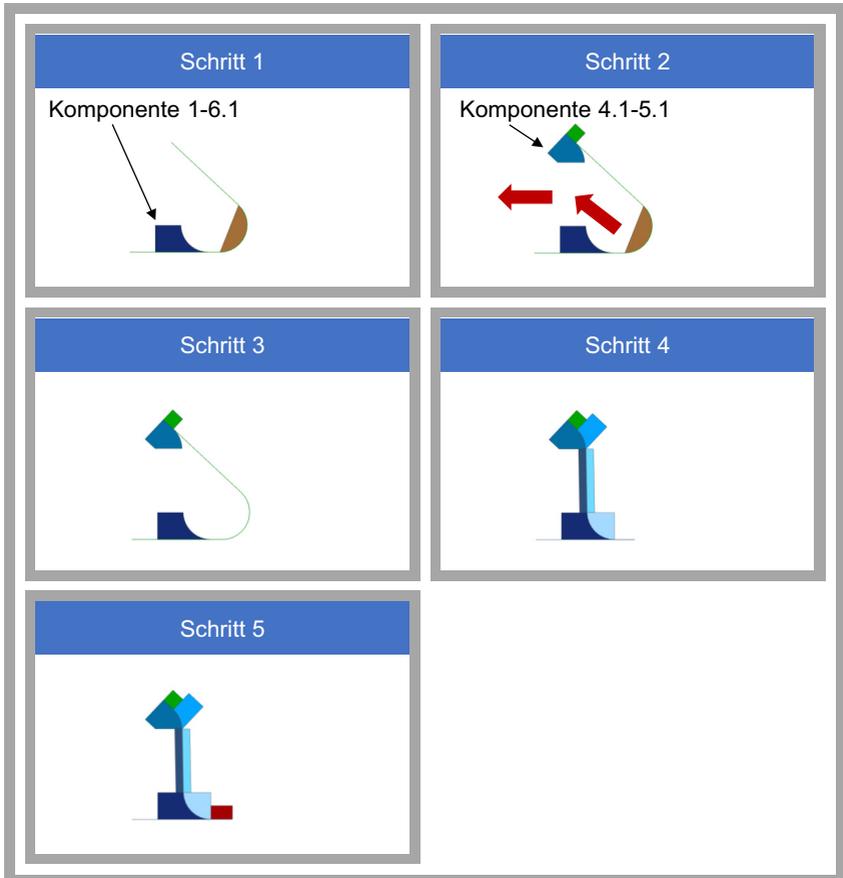


Abbildung 7-19 Konzept 1 Komponentenanzahl

Bei Konzept 1 werden die Komponenten 1 und 6.1 zu einer Komponente zusammengefasst. Diese wird bereits in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ eingebracht und bleibt bis Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ an ihrer Position. Ebenso werden die Komponenten 4.1 und 5.1 zusammengefasst und in Schritt 2 „Materialbahn sichern“ eingebracht. Komponente 2 kann nach der Sicherung der Materialbahn zwischen den Komponenten 1-6.1 und 4.1-5.1 hinweg aus dem benötigten Arbeitsraum entfernt werden. Das Zusammenfassen der Komponenten ist möglich, da diese durch ihre Positionierung die Materialbahnformung nicht einschränken, siehe Abbildung 7-18 und Abbildung 7-19.

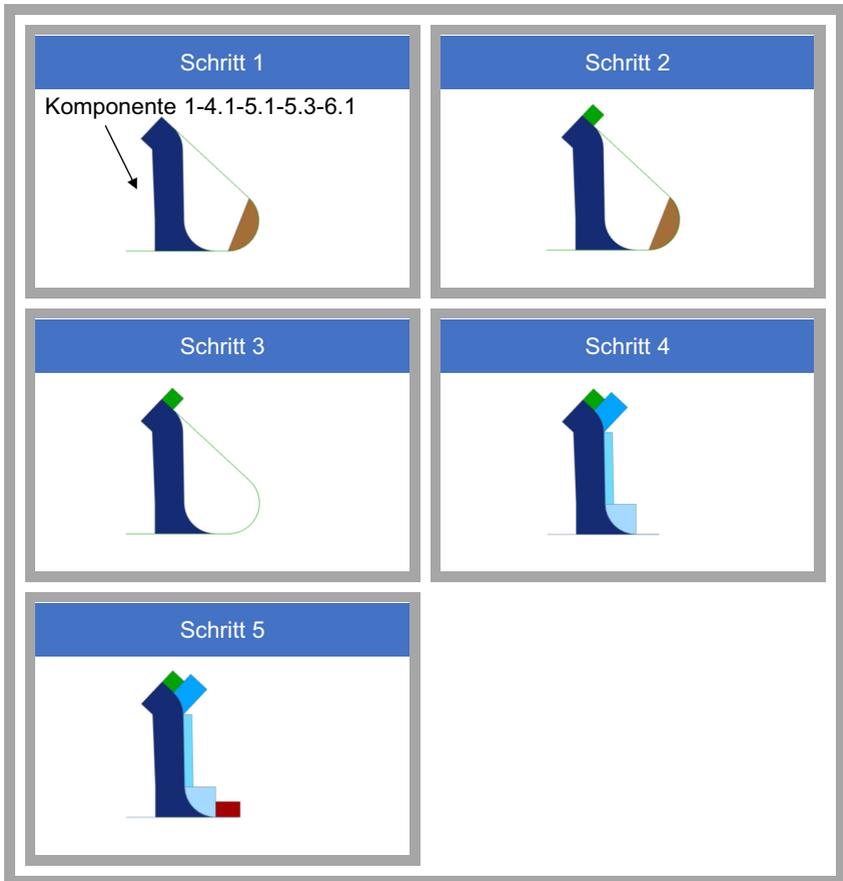
**Konzept 2:**

Abbildung 7-20 Konzept 2 Komponentenanzahl

Bei Konzept 2 werden die Komponenten 1, 4.1, 5.1, 5.3 und 6.1 zu einer Komponente zusammengefasst, welche von Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ bis Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“ an ihrer Position bleibt. Komponente 2 ist gemäß Abbildung 7-20 durch eine abhebende Bewegung von der Materialbahn und an-

schließlich einer Verfahrbewegung in Zeichenebene aus dem Arbeitsraum zu entfernen. Die Komponenten 5.2, 5.4 und 6.2 können aufgrund der geforderten segmentierten Stempellösung zum Anlegen der Materialbahn nicht zusammengefasst werden.

Aufgrund der Komponentenbewegungen und der Vorteile einer ganzheitlichen Werkzeugkontur von Position 4 bis Position 7 wird Konzept 2 weiterverfolgt und ausgestaltet. Die Bewegungen der für Konzept 2 benötigten Komponenten sind in Abbildung 7-21 ersichtlich. Hierbei gilt es zu unterscheiden, ob die Bewegung positionsgesteuert oder kraftgesteuert durchzuführen ist. Die Definition bezieht sich auf die Positionierung der Komponenten und deren Funktionserfüllung. Das Ausbringen der Komponenten ist kollisionsfrei zu realisieren. Für die auszugestaltenden Stempellösungen sind beide Varianten möglich.

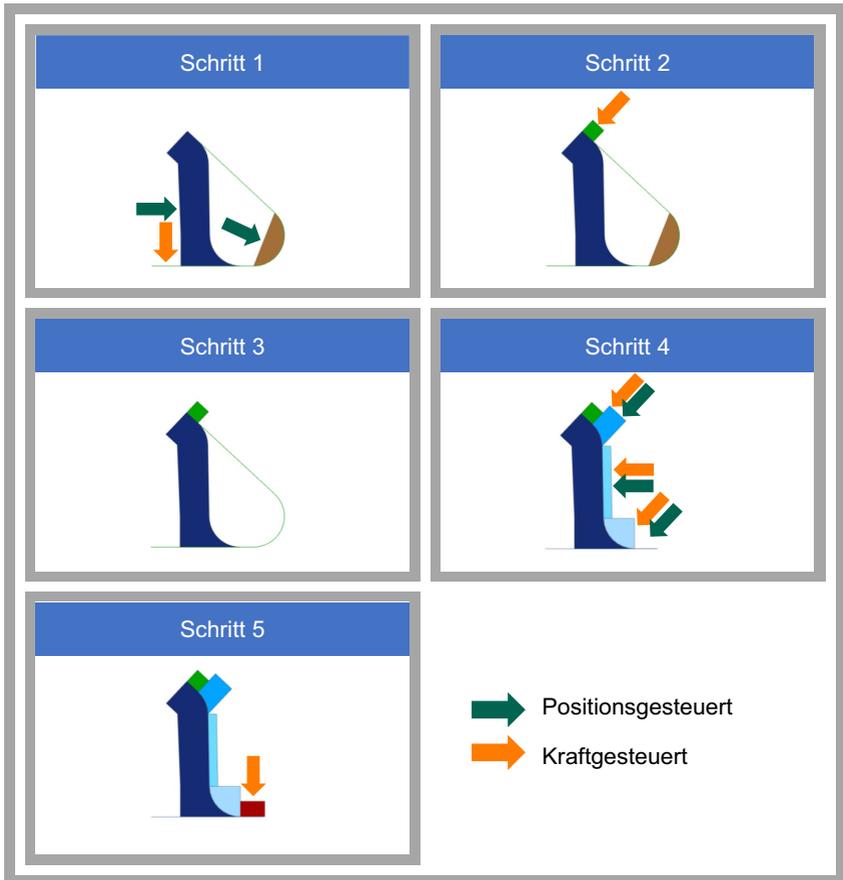


Abbildung 7-21 Bewegungsarten der Komponenten

Zur Validierung der Funktionsfähigkeit der prototypischen Realisierung des Verfahrensablaufs eignet sich als Kriterium das Anlegeverhalten der Materialbahn an die Komponentenkontur. Hierzu ist das Anlegeverhalten bei Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ und Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ von Relevanz, da diese entscheidend für die Ablagegenauigkeit sind. Zur Bestimmung des Anlegeverhaltens ist ein Vergleich der Längenmessungen der Komponentenkontur mit der sich angelegten Materialbahn durchzuführen.

## 7.2.4 Konstruktive Ausgestaltung der Werkzeugkomponenten

Für eine prototypische Realisierung des definierten Formungsablaufes werden die abgeleiteten Komponenten mit den dazugehörigen Bewegungsvorgaben konstruktiv ausgestaltet. Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Ablaufes ist eine manuelle Betätigung der Komponentenbewegungen ausreichend. Die Anforderungen an die Komponenten sind zum einen die in Kapitel 5.1 definierten Kriterien der Stapelbildung sowie die Randbedingungen der Umsetzung der errechneten Materialbahnverläufe und des damit verbundenen Anlegeverhaltens.

### Komponente 1

Der errechnete Materialbahnverlauf gibt die Kontur von Komponente 1 vor, diese ist in Abbildung 7-22 dargestellt. Das kraftgesteuerte Bewegungen in y-Richtung wird durch einen pneumatischen Antrieb mit Schlitten realisiert, die Positionierung in x-Richtung wird durch einen Spindellineartisch mit Trapezgewinde umgesetzt.

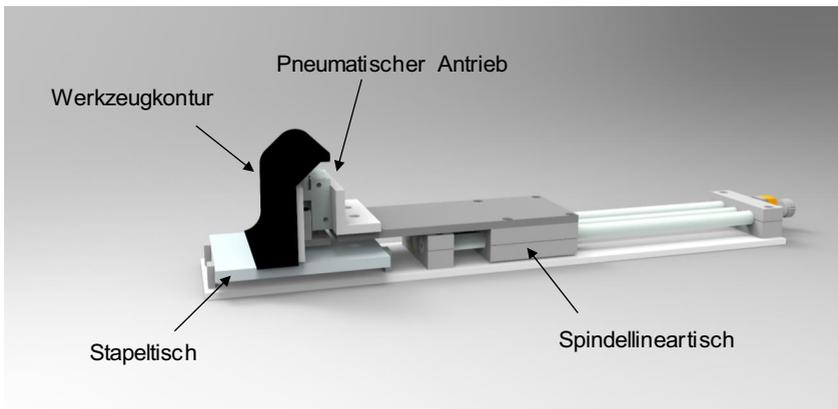


Abbildung 7-22 Komponente 1

### Komponente 2

Die Kontur des Werkzeugbereiches, welcher in Kontakt mit der Materialbahn kommt, ist durch den errechneten Materialbahnverlauf bestimmt. Diese wird mittels eines Linearschlittens über den Stapeltisch positioniert, die Positionierung in y-Richtung erfolgt durch einen Hubtisch, die Positionierung in x-Richtung durch einen Spindellineartisch.

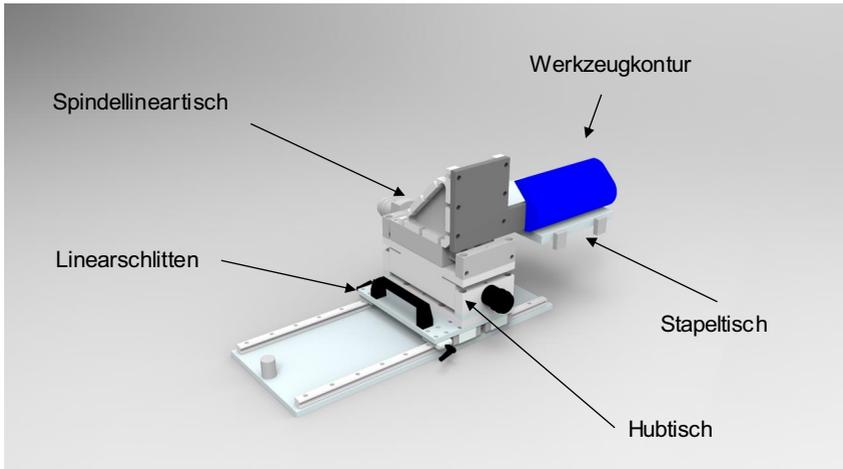


Abbildung 7-23 Komponente 2

#### Komponenten 4.2, 5.2, 5.4, 6.2

Die Handhabungseinheit für die Stempel ist in Abbildung 7-24 dargestellt. Hierbei wird das Stempelsystem durch einen Linearschlitten zunächst positioniert. Die Interaktion der Stempel mit der Materialbahn erfolgt anschließend durch geführte Pneumatikzylinder. Die Komponente 6.2 ist mit einem Spindellineartisch zur Kollisionsvermeidung mit Komponente 5.4 in x-Richtung zusätzlich zum Linearschlitten zu verfahren.

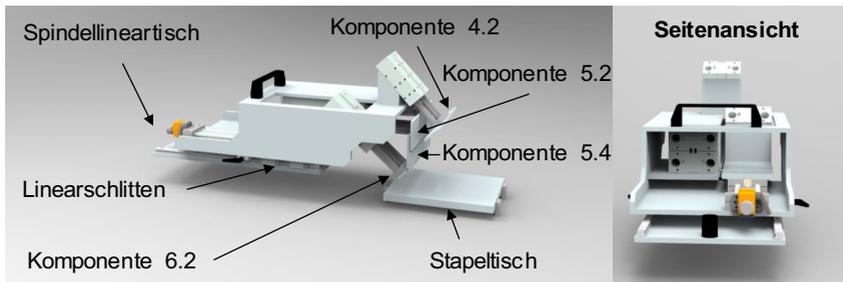


Abbildung 7-24 Stempelsystem

Damit das Anlegen der Materialbahn materialschonend erfolgt und zudem von Position 4 beginnend fortlaufend erfolgt, werden die Stempel mittels elastischem Schaumstoff realisiert. Diese elastischen Komponenten der Stempel sind zudem so zu gestalten, dass der jeweils erste Berührungspunkt des Stempels mit der Werkzeugkontur auch der erste Sicherungspunkt der Materialbahn durch den Stempel ist. Daher erfahren die ersten Berührungspunkte eine hohe Kompression der elastischen Komponente, damit sich die Werkzeugkontur sukzessive in dieser abbildet. In Abbildung 7-25 sind die Stempel in ihrem ersten Berührungspunkt mit der Werkzeugkontur in Gelb dargestellt, die komprimierten Zustände der Stempel sind in Orange ersichtlich.

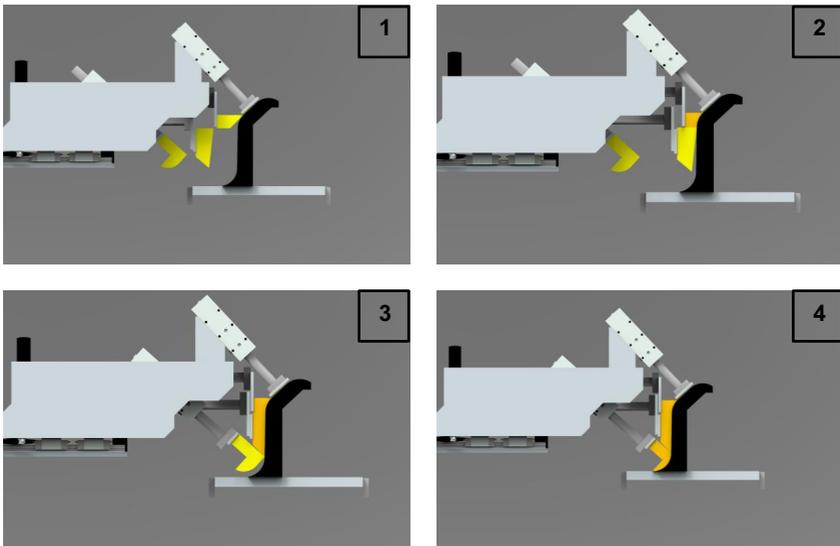


Abbildung 7-25 Elastische Stempel

### Komponente 7

Komponente 7 zur Sicherung der Materialbahn auf dem Stapel wird in x-Richtung mit einem Spindellineartisch positioniert. Die y-Bewegung wird durch einen geführten pneumatischen Antrieb realisiert, siehe Abbildung 7-26.

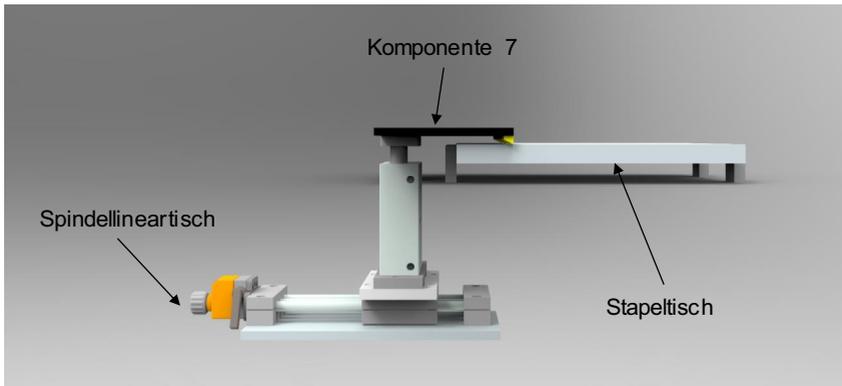


Abbildung 7-26 Komponente 7

Aus den vorgestellten Einzelkomponenten ergibt sich der in Abbildung 7-27 dargestellte Gesamtaufbau.

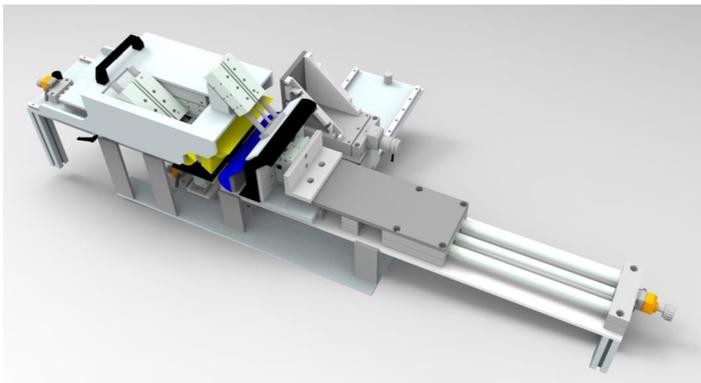
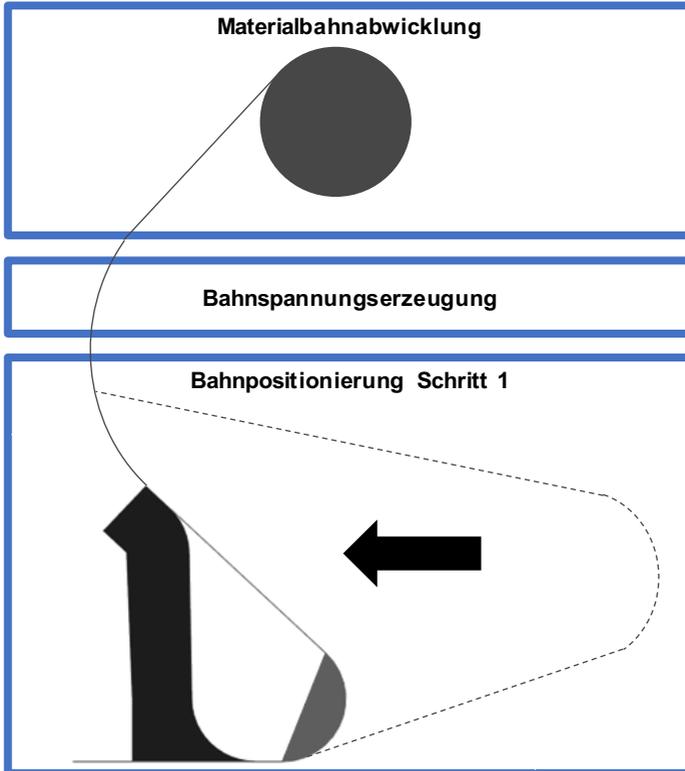


Abbildung 7-27 Formungskomponenten

### 7.3 Konzeption Materialbahnzuführung

Ziel der Materialbahnzuführung ist es, die Materialbahn vom Coil abzuwickeln und dem zuvor beschriebenen Formungsverlauf zuzuführen. Zudem ist das Bewegen der Materialbahn in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ an Position 3 zu realisieren.

Diese Materialbahnförderung sollte kurze freie Materiallängen und geringe Umschlingungswinkel der benötigten Umlenkungen aufweisen. Die dafür benötigten Einheiten sind in Abbildung 7-28 schematisch dargestellt.



*Abbildung 7-28 Übersicht Materialbahzuführung*

Hieraus ist ersichtlich, dass drei Komponenteneinheiten benötigt werden: die Materialbahnabwicklung, die Bahnspannungserzeugung und die Bahnpositionierung bzw. Bahnbewegung in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“. Für eine materialchonende Verarbeitung und eine definierte Förderung mit kurzen freien Materiallängen ist gegebenenfalls zwischen den einzelnen Blöcken noch eine Materialbahnumlenkung und/oder Materialbahnabstützung zu realisieren. Die benötigten Einheiten werden

im Folgenden konkretisiert und ausgestaltet. Aufgrund der direkten Abhängigkeit zwischen der Abwicklung und der Bahnspannungserzeugung werden diese gemeinsam diskutiert.

### **7.3.1 Konzeption Abwicklung und konstante Bahnspannungserzeugung**

Aufgrund der geringen Eigensteifigkeit der zu verarbeitenden kontinuierlichen Materialbahn kann diese nicht durch Schieben gefördert werden, sondern muss entsprechend unter Zugbeanspruchung verarbeitet werden. Dieser Bahnzug sollte konstant sein (Zitt 2001, S. 1), da ansonsten beispielsweise hohe lokale Beanspruchungen in der Materialbahn oder eine Veränderung der Materialbahnposition hervorgerufen werden können. Aus diesem Grund ist die Materialbahnabwicklung mit der Bahnspannung gekoppelt und nicht mit einer definierten Längenabwicklung zu realisieren. Wie in Abbildung 7-28 ersichtlich, ist die Materialbahn durch Formungskomponenten fixiert. Daher ist der vorliegende Betrachtungsraum für die Abwicklung und Bahnspannung von der Fixierung bis zum Materialcoil. Wird diese Materialbahnlänge zwischen der Fixierung und dem Coil beispielsweise durch die Bewegung der Bahn zur Positionierung an die Werkzeugkontur in Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“ größer, ohne dass Material nachgefördert wird, würde die Bahnspannung steigen. Im Gegensatz dazu würde die Bahnspannung sinken, wenn die Länge, ohne eine Materialnachförderung verkürzt würde. Neben der Änderung der Bahnlänge können Störgrößen auf die Materialbahn einwirken und eine Schwankung der Bahnspannung hervorrufen, daher werden für den vorliegenden Anwendungsfall nachfolgende Konzepte für eine Erzeugung einer konstanten Bahnspannung diskutiert.

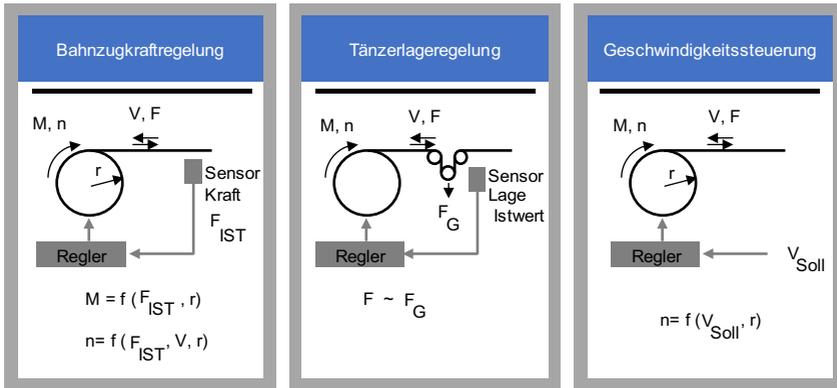


Abbildung 7-29 Konzepte zur Erzeugung konstanter Bahnspannung in Anlehnung an (Kiel 2007, S. 392) und (Weidauer 2013, S. 265)

### Zugkraftregelung

Bei diesem Konzept wird ein Kraftmesser zur Erfassung des herrschenden Materialzugs in eine Umlenkwellen im Materialbahnverlauf integriert. Der detektierte Wert wird an den Bahnzugkraftregler übermittelt, welcher aufgrund der Differenz von Sollwert zu Istwert einen Stellwert ermittelt. Dieser Stellwert wird wiederum an den Antrieb oder die Bremse der Materialbahnabwicklung weitergegeben, wo der Wert entsprechend in eine Veränderung des Drehmoments oder der Drehzahl des Coils umgesetzt wird und somit die Bahnspannung erzeugt wird, siehe Abbildung 7-29 links. Mittels der Abmessungen des verwendeten Bahnmaterials (Dicke, Breite) kann über der herrschenden Bahnzugkraft die Bahnspannung errechnet werden.

### Tänzerlagerregelung

Bei der Tänzerlagerregelung wird eine konstante Kraft auf die Materialbahn aufgebracht, beispielsweise durch eine Masse und die dadurch resultierende Gewichtskraft oder einen Pneumatikzylinder. Diese konstant einwirkende Kraft sorgt für eine konstante Bahnspannung. Ein Sensor detektiert dabei die Lage der Masse oder des Pneumatikzylinders und übermittelt diese an den Regler, sodass aufgrund dieser Position ein Stellwert für die Abwicklung errechnet werden kann und die entsprechende Materialförderung erfolgen kann, siehe Abbildung 7-29 Mitte.

## **Geschwindigkeitssteuerung**

Eine weitere Möglichkeit zur Generierung einer Bahnspannung ist eine Geschwindigkeitssteuerung. Hierbei wird eine Sollgeschwindigkeit vorgegeben. Für diese Sollgeschwindigkeit wird die benötigte Drehzahl zur Materialabwicklung errechnet. Die Geschwindigkeitsvorgabe basiert auf der benötigten nachzufördernden Materialbahnlänge, sodass vom Coil bis zum benötigten Arbeitspunkt zu jedem Zeitpunkt die Materialbahnlänge bekannt sein muss und somit die Sollgeschwindigkeit, welche dementsprechend zeitlich variiert, errechnet werden kann. Die Materialbahnlänge ist so zu bestimmen, dass das Material entsprechend gestrafft ist.

Aufgrund der Fixierung der Materialbahn auf dem Stapel, siehe Abbildung 7-28, und der Bewegung der Materialbahn an die Werkzeugkontur wird eine Änderung der Materialbahnlänge hervorgerufen, weshalb eine Ab- und Aufwicklung bzw. eine Nachförderung notwendig ist. Diese Änderung der Länge erfolgt nicht kontinuierlich. Der Bewegung der Materialbahn folgt die Formung, bei welcher bedingt durch die Fixierung keine Längenänderung erfolgt. Aufgrund des Bewegungsablaufes, welcher durch den Beschleunigungs- und Bremsvorgang ein trapezförmiges Geschwindigkeitsprofil aufweist, und einer darauffolgenden Phase der durch die Formung bedingten konstanten Bahnlänge, variiert der Einfluss der Bahnlängenänderung auf eine konstante Bahnspannung zeitlich. Störgrößen können zu jedem Zeitpunkt auftreten.

Durch die Forderung nach einer zu jedem Zeitpunkt konstanten, definierten Bahnspannung eignet sich das Prinzip der Geschwindigkeitssteuerung nicht, da dieses auftretenden Störgrößen nicht entgegenwirken kann. Der Vorteil der Tänzerlageregelung gegenüber der Zugkraftregelung ist, dass bei einer Tänzerlageregelung auch bei dynamischen Anforderungen die Bahnspannung durch das Ausgleichsverhalten des Tänzers konstant bleibt (Kiel 2007, S. 406). Hierbei ändert sich zwar die Position des Tänzers, die Bahnspannung bleibt jedoch konstant. Aufgrund dieser Tatsache wird zur Generierung einer konstanten Bahnspannung das Prinzip der Tänzerlageregelung ausgewählt. Damit der Betrag der Bahnspannung als Parameter ohne Umbaumaßnahmen eingestellt werden kann, wird zur Erzeugung der Zugkraft ein Pneumatikzylinder verwendet. Für eine direkte Ermittlung des Bahnspannungswertes wird eine Messwalze in den Materialbahnverlauf implementiert, da mit dem Pneumatikzylinder über den dort wirkenden Druck nur indirekt, rechnerisch auf die Bahnspannung geschlossen, jedoch nicht die tatsächlich herrschende Bahnspannung exakt bestimmt werden kann.

### 7.3.2 Konzeption Bahnförderung

Neben der Materialbahnabwicklung und der Tänzerlageregelung gilt es, eine Positionierung der Materialbahn an die Werkzeugkontur des Formungsablaufes umzusetzen. Diese Bewegung der Materialbahn wird durch eine horizontale Verfahrbewegung einer Umlenkrolle realisiert. Der Umschlingungswinkel der Messwalze zur Detektion der Bahnspannung muss konstant  $180^\circ$  betragen, dadurch ergibt sich der in Abbildung 7-30 dargestellte Aufbau zur Materialbahnförderung. Auf eine laterale Ausrichtung der Materialbahn wird, aufgrund der kurzen abzuwickelnden Bahnlängen und der wenigen, kurzen freien Bahnlängen im Materialbahnverlauf, für eine prototypische Realisierung verzichtet.

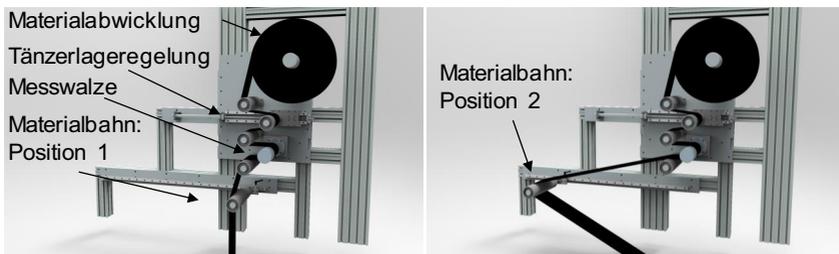


Abbildung 7-30 Materialbahnverlauf

### 7.4 Zusammenfassung Konzeptionierung

Zunächst wurden die für den Materialbahnverlauf notwendigen Komponenten konzipiert. Hierfür wurden die Bereiche der Materialbahnverläufe identifiziert, in welchen für eine Funktionserfüllung Komponenten benötigt werden. Für diese Bereiche konnten darauf aufbauend die Technologien zur Funktionserfüllung ausgewählt werden. Die Funktion des Sicherns wird durch Klemmen mittels Reibkraft umgesetzt, für das Anlegen der Materialbahn an die Werkzeugkontur konnte die Stempeltechnologie als geeignete Technologie identifiziert werden. Basierend auf den identifizierten Bereichen, den ausgewählten Technologien und den notwendigen Werkzeugkonturen konnte die Anzahl der benötigten Komponenten und die jeweils notwendigen Bewegungsrichtungen abgeleitet werden. Entsprechend wurden die Komponenten konstruktiv ausgestaltet. Die für die Materialbahnförderung notwendigen Komponenten wurden ebenfalls betrachtet. Hierbei konnte die Tänzerlageregelung als geeignetes Prinzip zur Erzeugung

einer konstanten Bahnspannung ausgewählt werden. Die Komponenten der Materialbahnförderung wurden zudem konstruktiv ausgestaltet, sodass alle erforderlichen Komponenten zur Umsetzung der Materialbahnförderung und des Formungsablaufes auskonstruiert vorliegen. Diese gilt es im Folgenden prototypisch zu realisieren, damit anhand der realisierten Komponenten die errechneten Materialbahnverläufe und damit die Funktionsfähigkeit des Materialformungsablaufes mit den ausgewählten Technologien überprüft werden kann.

Zur Überprüfung der Realisierbarkeit und der Funktionsfähigkeit des definierten Faltungsablaufes mit den ausgewählten Technologien ist es erforderlich, die dafür notwendigen Komponenten prototypisch umzusetzen. Daher werden im Folgenden zunächst die realisierten Komponenten der Materialbahnförderung vorgestellt, gefolgt von der Erläuterung der Umsetzung des Faltungsablaufes.

## **7.5 Prototypische Umsetzung Materialbahnförderung**

Für die Realisierung der zuvor definierten Materialbahnförderung gilt es zunächst eine geeignete Steuerungsarchitektur zu erarbeiten. Daher wird nachfolgend auf die Steuerungstechnik und im Anschluss daran auf die Umsetzung der Materialbahnförderung eingegangen.

### **7.5.1 Steuerung der Materialbahnförderung**

Zur Steuerung der Materialbahnabwicklung und der Tänzerlageregelung wird die in Abbildung 7-31 dargestellte Steuerungsarchitektur umgesetzt. Hierbei wird ein Tablet als Bedienschnittstelle verwendet. Die Datenübertragung zwischen dem Tablet und der Steuerungsebene erfolgt mittels WLAN. Als Steuerungsgerät wird ein Einplatinencomputer, BeagleBone Black, eingesetzt. Für die Regelung wird ein Mikrocontroller, STM32F4 Entwicklungsboard, verwendet. Die Kommunikation zwischen Steuerungsgerät und Regelungsgerät erfolgt über ein CAN-BUS-System. Diese modulare Architektur ermöglicht eine nachträgliche Erweiterung mit mehreren Regelungsgeräten ohne Abänderung der Struktur.

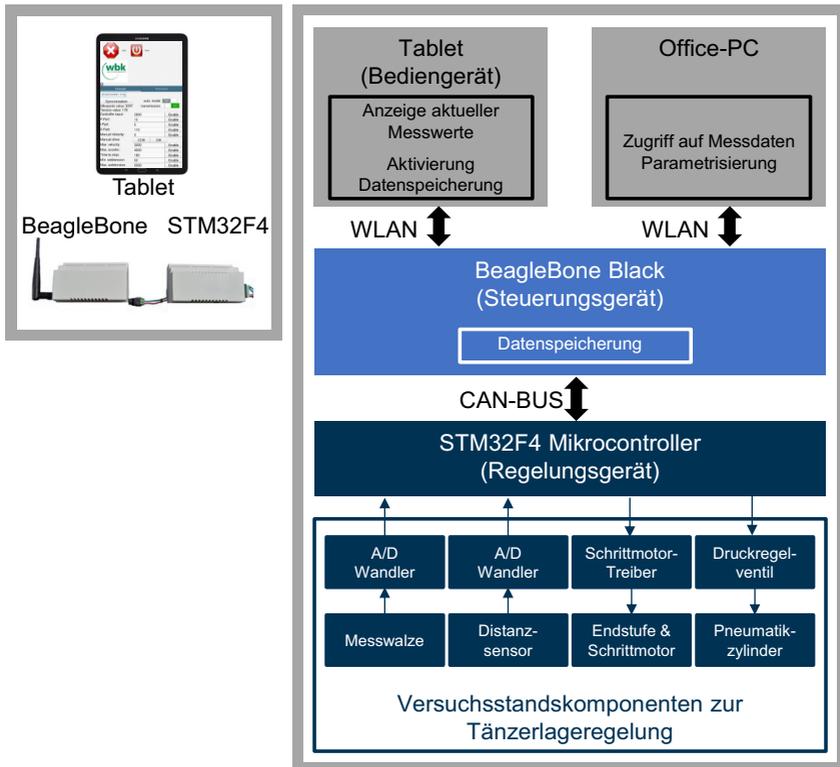


Abbildung 7-31 Steuerungsarchitektur

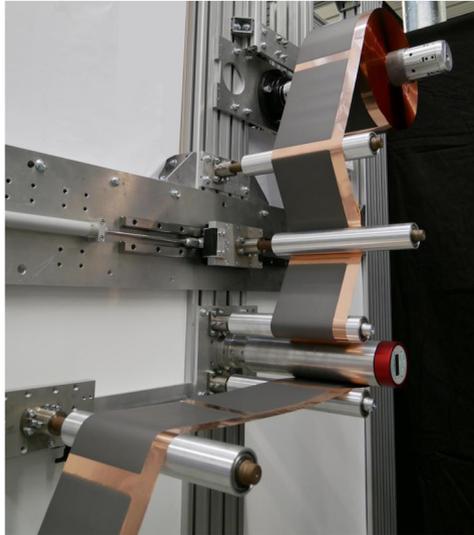
Am Tablet kann zwischen einem manuellen Betrieb und einem Automatikmodus ausgewählt werden. Beim manuellen Betrieb kann das Materialcoil mit der zuvor eingegebenen Geschwindigkeit in die ebenfalls eingegebene Richtung rotiert werden, sodass die Materialbahn entsprechend auf- bzw. abgewickelt wird, ohne dass dabei eine Regelung der Bahnspannung erfolgt. Dies ist insbesondere beim Einrichten und Einfädeln der Materialbahn zwischen die Umlenkwellen notwendig. Im Automatikmodus erfolgt die Tänzerlagerregelung auf die Sollbahnspannung. Hierbei werden die Prozessparameter der Messwalze und des Distanzsensors auf dem Tablet visualisiert. Zudem kann

eine Messdatenspeicherung gestartet und beendet werden. Die grafische Benutzeroberfläche wurde im Rahmen von (A\_Weller 2016) und (A\_Gehrig 2017) implementiert und ist in Abbildung 7-32 dargestellt.



Abbildung 7-32 Bedienoberfläche Tablet

## 7.5.2 Materialbahnförderung



*Abbildung 7-33 Materialbahnförderung*

Die realisierte Materialbahnförderung ist in Abbildung 7-33 ersichtlich. Hierbei wird der Materialcoil mittels einer pneumatischen Expansionsspannwelle fliegend gelagert. Diese wird über ein Zahnriemengetriebe mit einer Untersetzung von 1:2 durch einen Schrittmotor mit einem Haltemoment von 13 Nm angetrieben. Die Umlenkwellen sind mit dünnwandigen Hohlwellen, welche an starren Wellen angebrachten, Kugellagern befestigt sind, realisiert, sodass eine geringe Massenträgheit resultiert und eine leichtgängige Drehbarkeit gewährleistet werden kann. Die Erzeugung der Bahnspannung mittels der Tänzerlagerregelung wird durch einen pneumatischen Rundzylinder und ein Proportional-Druckregelventil realisiert. Dieses weist eine geringe Hysterese von  $0,5 \% * p_{max}$  auf (FESTO 2020), sodass eine gute Regelbarkeit gegeben ist. Die Position der Tänzerwelle wird durch einen analogen Ultraschallsensor detektiert. Zur direkten Ermittlung der herrschenden Bahnspannung ist eine analoge, fliegend gelagerte Kraftmesswalze in den Bahnverlauf integriert. Wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben,

ist der Umschlingungswinkel hierbei konstant bei  $180^\circ$  zu halten. Die Materialbahnbe-  
 wegung ist mit einer manuell verschiebbaren Umlenkrolle, welche klemmbar an Profil-  
 führungsschienen angebracht ist, realisiert.

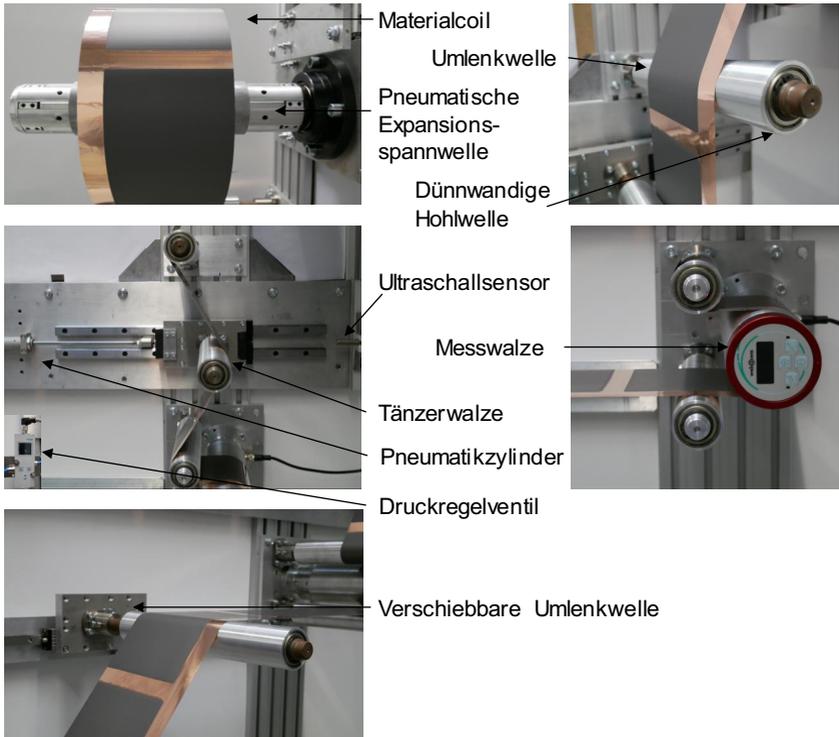


Abbildung 7-34 Komponenten der Materialbahnförderung

## 7.6 Prototypische Umsetzung Faltungsablauf

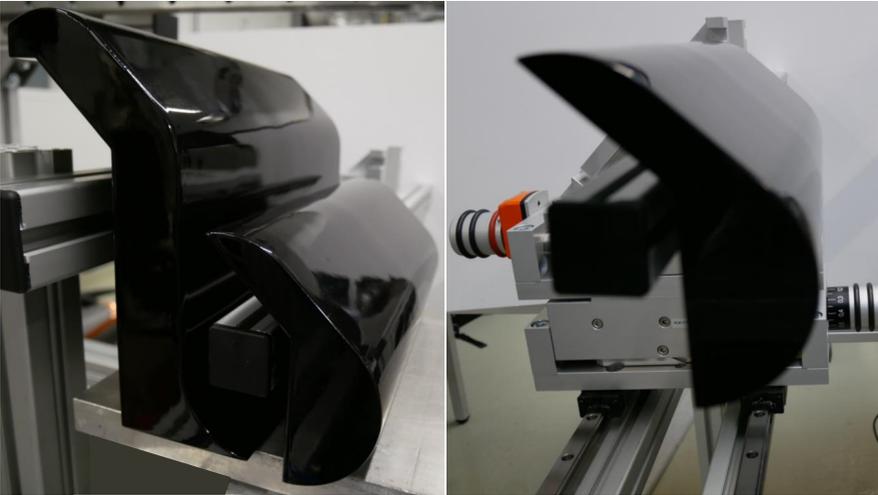


Abbildung 7-35 Komponentenkonturen (links), Achsen von Komponente 2 (rechts)

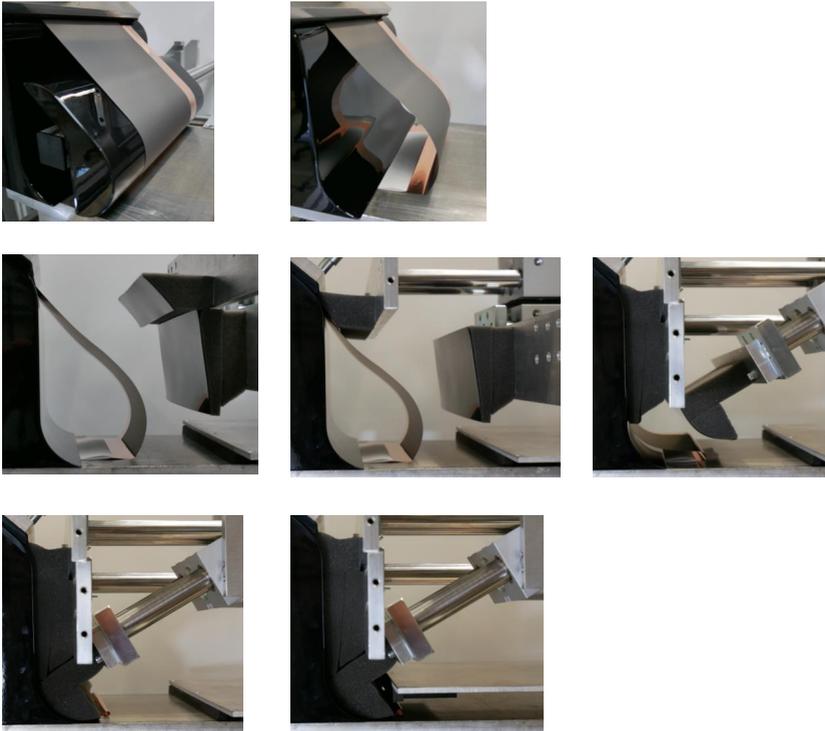
Die Komponenten, deren Konturen gemäß dem in Kapitel 7 definierten Sollmaterialbahnverlauf gefertigt wurden, sind in Abbildung 7-35 dargestellt. Diese wurden Laser- gesintert und bestehen aus mit Glasparkeln gefüllten Polyamid-Pulvern, zudem sind die Bauteile lackiert. Komponente 2 kann mittels eines Hubtisches in der Höhe manuell positioniert und mit einem Spindellineartisch sowie mittels Linearschlitzen in den beiden notwendigen Raumrichtungen verfahren werden. Die realisierten Stempel für das Anlegen der Materialbahn an die Komponentenkontur sind in Abbildung 7-36 ersichtlich. Damit sich die Stempel der Kontur anpassen können, bestehen diese aus Schaumstoff mit einem Raumgewicht von  $26 \text{ kg/m}^3$  und einer Stauchhärte von  $3,5 \text{ kPa}$  bei  $40 \%$  Kompression. Die Stempelkonturen sind so ausgelegt, dass der erste Kontaktpunkt des jeweiligen Stempels mit der Komponentenkontur dem Punkt entspricht, welcher gemäß einem sukzessiven Anlegen der Materialbahn an die Kontur an der Reihe ist. Die nachfolgenden Kontaktpunkte der jeweiligen Stempel entsprechen ebenfalls dem Anlegeverhalten. Zudem sind die Stempel so ausgelegt, dass eine maximale Kompression von  $40 \%$  nicht überschritten wird. Damit, sofern nötig, ein Abgleiten der Materialbahn an

der Stempelkontur ermöglicht wird, sind die Stempelkontaktflächen mit einer beschichteten Gleitfolie überzogen. Die Positionierung der Stempel sowie deren Kompression erfolgt jeweils über geführte Pneumatikzylinder.

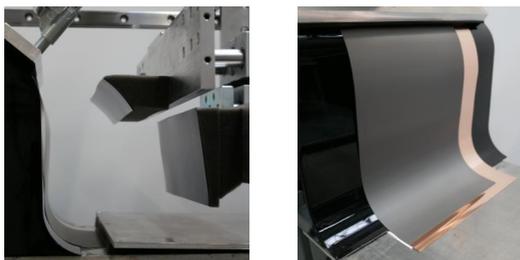


*Abbildung 7-36 Realisierte Stempeltechnologie*

Der realisierte Verfahrensablauf der definierten fünf Schritte zur Materialbahnformung wird nachfolgend diskutiert. Zunächst wird durch die Bewegung der Materialbahnförderung die Materialbahn an die Komponentenkontur angelegt. Anschließend erfolgt die Fixierung der Materialbahn an Komponente 1, sodass Komponente 2 entfernt werden kann. Nachdem die Stempel mit Linearschlitten positioniert sind, wird das Anlegen der Stempel an die Komponentenkontur und damit das Anlegen der Materialbahn mittels der geführten Zylinder realisiert. Hierzu wird zunächst Stempel 2 verfahren, gefolgt von Stempel 3 und 4, sodass die Materialbahn an Komponente 1 vollständig anliegt. Daraufhin kann Komponente 7 positioniert werden und die Materialbahn auf dem Stapel bzw. dem Stapeltisch fixiert werden. Der beschriebene Ablauf ist in Abbildung 7-37 dargestellt.



*Abbildung 7-37 Stempelabfolge Anodenmaterialbahn*



*Abbildung 7-38 Entfernen Stempel Anodenmaterialbahn*

Nachdem die Materialbahn in ihrer Sollposition durch Komponente 7 fixiert wurde, können die Stempel entfernt und die obere Sicherung der Materialbahn gelöst werden. Das Entfernen der Stempel ist in Abbildung 7-38 dargestellt. Aus dem vorgestellten Ablauf ist ersichtlich, dass sich die Anodenmaterialbahn mittels der konzipierten Stempeltechnologie an die Komponentenkonturen anlegen lässt und dabei durch die umgesetzte Sicherung durch Klemmkraft fixiert werden kann. Zur Sicherstellung der Prinzipfähigkeit des konzipierten Verfahrensablaufs wird das Anlegeverhalten der Materialbahn an die Komponentenkontur, gemäß Kapitel 7.2.3, mittels Längenmessung durch eine Stichprobe überprüft. Hierzu wird die Länge der Komponentenkontur gemäß Abbildung 7-39, ausgehend von Beginn der Kontur von Komponente 1 bis hin zu Komponente 2, vermessen. Diese Länge beträgt 245,5 mm. Ebenso wird nach dem Anlegen der Anodenmaterialbahn an die Komponentenkontur 1 die Länge der Materialbahn zwischen den beiden Punkten vermessen, indem Markierungen an beiden Punkten an der Materialbahn angebracht werden. Damit kann die Länge im wieder hergestellten ebenen Zustand der Materialbahn nachträglich detektiert werden kann. Diese Länge beträgt 245,5 mm und stimmt mit der zuvor gemessenen Konturlänge überein. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass sich die Anodenmaterialbahn vollständig an die Komponentenkontur 1 angelegt hat, da andernfalls ein Längenunterschied zu verzeichnen sein müsste.



*Abbildung 7-39 Konturlänge Komponente 2*

Zur Überprüfung des Anlegeverhaltens der Anodenmaterialbahn an die Komponentenkontur 2 durch die eingesetzte Stempeltechnologie wird ebenfalls eine Längenmessung verwendet, da eine Positionsüberprüfung der Materialbahn während des Verfahrensablaufes aufgrund der Verdeckung der Materialbahn durch die Stempel nicht möglich ist. Daher wird die Konturlänge gemäß Abbildung 7-40 vermessen. Diese Länge beträgt 174,5 mm. Zur Bestimmung der Anodenbahnlänge zwischen den beiden Punkten wird

der definierte Verfahrensablauf durchgeführt. Bevor die Stempel wieder von der Materialbahn entfernt werden, werden Markierungen an den beiden Messpunkten angebracht, sodass die Bahnlänge anschließend im ebenen Zustand bestimmt werden kann. Diese Länge beträgt 174,5 mm. Daher ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass sich die Anodenmaterialbahn vollständig an die Komponentenkontur 2 angelegt hat. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Anodenmaterialbahn an die beiden Komponentenkonturen vollständig anlegt, ist festzustellen, dass die Eignung des definierten fünf-schrittigen Verfahrensablauf mit den verwendeten Komponentenkonturen, der ausgewählten Sicherung durch Klemmkraft und der realisierten Stempeltechnologie für den vorliegenden Anwendungsfall gegeben ist.



*Abbildung 7-40 Konturlänge Komponente 1*

Analog zum Verhalten der Anodenmaterialbahn wird das Anlegeverhalten der Separatormaterialbahn untersucht. Der Verfahrensablauf ist in Abbildung 7-41 ersichtlich.



*Abbildung 7-41 Stempelabfolge Separatorbahn*

Zur Überprüfung der Eignung der Komponenten zur Separatorverarbeitung wird analog zur Anodenmaterialbahn die Separatorbahnlänge beim Anlegen an die Komponentenkonturen bestimmt. Die Separatorbahnlänge bei Komponente 1 beträgt 245,5 mm, bei Komponente 2 174,5 mm. Aufgrund der Übereinstimmung der Längen mit den Konturlängen kann schlussgefolgert werden, dass eine Eignung vorliegt.

## **7.7 Zusammenfassung Prototypische Umsetzung**

Zunächst wurden die realisierten Komponenten der Materialbahnförderung vorgestellt. Insbesondere wurde hierbei die umgesetzte Steuerungsarchitektur erläutert, welche mit einem Tablet als Bediengerät, einem BeagleBone Black Einplatinencomputer als Steuereinheit und einem Mikrocontroller als Regelungseinheit realisiert wurde. Der Materialbahnverlauf wurde mit einer Tänzerlageregelung zur Erzeugung einer konstanten Bahnspannung umgesetzt. Des Weiteren wurden die realisierten Komponenten des konzipierten Verfahrensablaufs vorgestellt. Die Stempeltechnologie zum Anlegen der Materialbahn an die Komponentenkonturen wurde mittels elastischer Stempel aus

Schaumstoff, welche mit einer beschichteten Gleitfolie überzogen sind, realisiert. Die Prinzipfähigkeit des definierten Verfahrensablaufes, der ausgewählten Technologien zum Sichern und Anlegen der Materialbahn an Konturen sowie die realisierten Komponenten konnte anhand der Überprüfung des Anlegeverhaltens der Anodenmaterialbahn und der Separatormaterialbahn mittels Längenmessung nachgewiesen werden.

## 8 Bewertung Stapeldesign und Verfahren

Die Ergebnisse der Erarbeitung des Stapeldesigns und des Verfahrensablaufs werden anhand der im Stand der Forschung und Technik abgeleiteten Fragestellungen diskutiert.

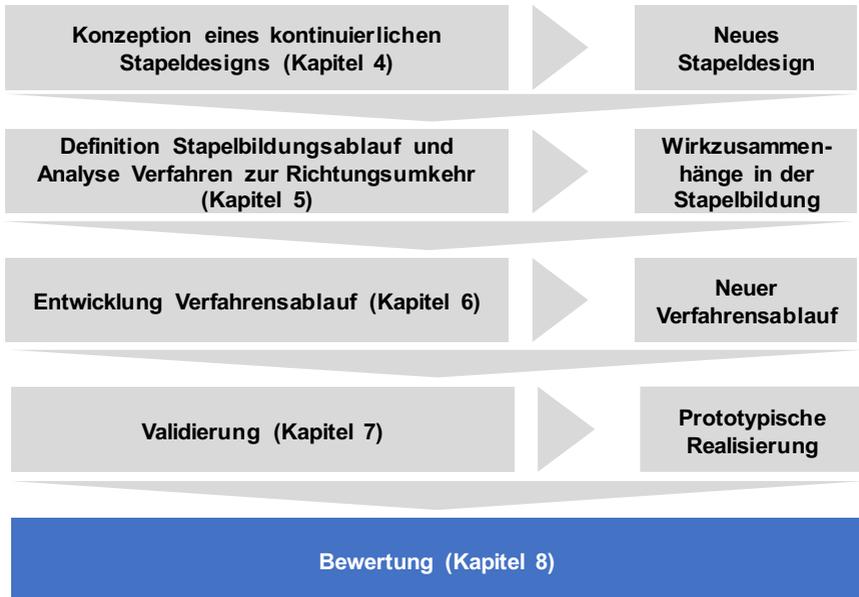


Abbildung 8-1 Vorgehensweise Kapitel 8

Nachfolgend sind die Fragestellungen sowie die Bewertungen der Lösungen dieser aufgeführt:

- Wie muss ein Stapeldesign gestaltet sein, damit dieses eine hohe Energiedichte und kontinuierliche Materialbahnen aufweist und bei dem zudem, bei einer großformatigen rechteckigen Grundfläche, die Aktivflächen ausschließlich eben zueinander angeordnet sind?

Diese Fragestellung wurde durch die Erarbeitung des Stapeldesigns „Zweifaches Z-Falten“ in Kapitel 4 adressiert. Die Anforderungen an das Stapeldesign wurden in Kapitel 4.1 konkretisiert, sodass die Kriterien der ausschließlich ebenen geometrischen Anordnung der Aktivflächen, der hohen Energiedichte, der Unabhängigkeit des Sta-

pelaufbaus von mechanischen Aktivmaterialeigenschaften, der rechteckigen Grundfläche mit prismatischer Stapelform, der kontinuierlichen Materialbahnen sowie der Robustheit des Stapelaufbaus zur Beurteilung herangezogen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die Aktivflächen im Stapeldesign ausschließlich eben angeordnet sind, ist das Kriterium der ausschließlich ebenen Anordnung der Aktivflächen beim Zweifachen Z-Falten Stapeldesign erfüllt.

Die Energiedichte konnte durch die Verwendung einer doppelseitig beschichteten Anodenmaterialbahn und einer einseitig beschichteten Kathodenmaterialbahn gegenüber dem klassischen Z-Falten mit einseitig beschichteten Elektroden erhöht werden. Jedoch weist ein Stapel, welcher aus doppelseitig beschichteten Einzelblättern aufgebaut ist, eine noch höhere Energiedichte auf.

Da die Aktivflächen ausschließlich eben und zueinander parallel im Stapel angeordnet sind, ist die Unabhängigkeit des Stapelaufbaus von mechanischen Aktivmaterialeigenschaften gegeben.

Das Stapeldesign Zweifaches Z-Falten weist eine rechteckige Grundfläche mit prismatischer Stapelform auf, sodass dieses Kriterium erfüllt ist.

Der Stapelaufbau besteht aus kontinuierlichen Materialbahnen von Separator, Anode und Kathode, sodass die Ausgangsmaterialbahnen vollumfänglich im Stapel Verwendung finden.

Aufgrund der konstanten Intermittierungslückenbreite bei der Anodenmaterialbahn können einzelne beschichtete Aktivmaterialbereiche ausgespart werden und die Materialbahn anschließend wieder zusammengefügt werden. Durch die alternierende Intermittierungslückenbreite bei der Kathodenmaterialbahn müssen immer paarweise Aussparungen der Aktivmaterialbereiche erfolgen, damit die Intermittierungslückenreihenfolge gewahrt bleibt. Durch die Möglichkeit der Aussparung von Fehlstellen sowohl bei Anode als auch Kathode ist die geforderte Robustheit beim Zweifachen Z-Falten gegeben.

Zusammenfassend ist somit festzustellen, dass das Stapeldesign „Zweifaches Z-Falten“ die gestellten Anforderungen erfüllt.

- Wie muss ein Verfahrensablauf zur materialschonenden Herstellung dieses Stapeldesigns definiert sein? Welches sind hierbei die signifikanten Prozessschritte?

Der Verfahrensablauf für das Zweifache Z-Falten sieht vor, dass die beiden Separator-materialbahnen und die Anodenmaterialbahn in einer Verarbeitungsrichtung anzuordnen sind. 90° versetzt dazu ist die Kathodenmaterialbahn zu positionieren. Hierbei gilt es zu beachten, dass die einseitig beschichtete Kathodenmaterialbahn auf diese drei Materialbahnen abzulegen ist und unmittelbar durch ein weiteres Ablegen wieder in ihre Ausgangsposition zu überführen ist. Die signifikanten Prozessschritte des Verfahrensablaufs zur materialschonenden Herstellung des Zweifachen Z-Faltens wurden in Kapitel 5 hergeleitet. Hierbei konnten durch die Ursache-Wirkungs-Analyse die Bereiche Materialförderung, Materialbahnablage, und Materialparameter bei der Stapelbildung als relevant abgeleitet werden. Der Bereich der Materialbahnablage hat hierbei einen wesentlichen Einfluss. Innerhalb der Materialbahnablage ist die Materialbahnformung der signifikante Prozessschritt, sodass die Fragestellung beantwortet werden konnte.

- Wie muss die Prozessabfolge für eine präzise 180°-Materialbahnformung bei der Herstellung des Stapelaufbaus definiert sein, ohne dass die Gefahren der Partikelabplatzungen und Aktivmaterialausbrüche hervorgerufen werden?

Für die Prozessabfolge konnte basierend auf den Analysen bestehender Verfahren zur Materialformung eine Prozessabfolge bestehend aus fünf Schritten definiert werden. Diese Abfolge wird auf Basis der in Kapitel 5.4.1 aufgestellten Kriterien der materialschonenden Verarbeitung, Ablagepräzision, Unabhängigkeit von Aktivmaterialparametern und Vermeidung von trennenden Verfahren diskutiert.

Die materialschonende Verarbeitung der Prozessabfolge ist dadurch gegeben, dass Werkzeugkomponenten, welche mit den Materialbahnen in Interaktion stehen, keine scharfen Kanten aufweisen. Zudem sind zwischen unterschiedlichen Komponentenbereichen tangential Übergänge realisiert. Des Weiteren werden in der Prozessabfolge die Mindestbiegeradien der Materialien nicht unterschritten. Gleitbewegungen zwischen den Werkzeugkomponenten und der Materialbahn entstehen beim Prozessablauf in geringem Ausmaß. Zur Verminderung der Reibung wurden die betroffenen Komponentenbereiche mit einer entsprechenden Beschichtung versehen. Hierbei konnten mittels Sichtprüfung keine Beschädigungen festgestellt werden.

Die Ablagepräzision ist durch die werkzeuggebundene Formung gegeben. Die Prozessabfolge sieht hierbei zwei werkzeuggebundene Formungsschritte vor. Bei der daraus resultierenden Positionierung der Beschichtungskanten zueinander hat jedoch zudem die Genauigkeit der Beschichtung einen Einfluss.

Die Unabhängigkeit von Aktivmaterialparametern konnte dadurch dargestellt werden, dass als Mindestverarbeitungsradius der gängige Materialbahncoilradius verwendet wurde.

Die Verwendung von trennenden Verfahren konnte vermieden werden.

Somit ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass die gestellten Anforderungen erfüllt sind.

- Kann die grundlegende technische Machbarkeit dieser Prozessabfolge dargestellt werden?

Die Fragestellung wurde durch die prototypische Realisierung des konzipierten Verfahrensablaufs adressiert. Hierfür wurden die abgeleiteten Werkzeugkomponenten zur Materialbahnförderung und zur Herstellung einer Richtungsumkehr aufgebaut. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass die Materialbahn bei der Prozessabfolge den Werkzeugkonturen folgt und das vorausgesagte Materialanlegeverhalten eintritt und sich somit die entsprechenden Materialbahnverläufe einstellen. Daher ist festzustellen, dass die Prozessabfolge die Formung von Elektrodenbahnen und Separatorbahnen ermöglicht. Somit konnte die grundlegende technische Machbarkeit der Prozessabfolge dargestellt werden. Aufgrund der prototypischen Realisierung nur einer Materialrichtungs-umkehr kann keine Abschätzung für einen Flächenbedarf für eine vollumfängliche Stapelbildungsanlage, bei welcher alle notwendigen Materialrichtungs-umkehrungen integriert sind, getroffen werden. Ebenso ist keine Aussage zu einer realisierbaren Taktzeit der Prozessabfolge möglich, hierbei ist jedoch festzustellen, dass kontinuierliche Materialbahnen verwendet werden, die Verarbeitung jedoch aus vielen einzelnen aufeinanderfolgenden Positionierbewegungen zu realisieren ist. Daher ist keine kontinuierliche Verarbeitung der kontinuierlichen Materialbahnen möglich, sondern es sind viele einzelne Start-Stop-Vorgänge notwendig. Aufbauend auf der grundlegenden technischen Machbarkeit ist bei der technischen Weiterentwicklung der Prozessabfolge der Themenkomplex der Positioniergenauigkeit zu adressieren. Hierfür sind zum einen entsprechend genaue Versuchsaufbauten notwendig, wie sie bei einer grundlegenden technischen Machbarkeitsprüfung nicht gegeben sind. Zum anderen sind hierbei die

Genauigkeiten der Beschichtung zu betrachten, da die Position der Aktivmaterialbereiche auf der Trägerfolie einen maßgeblichen Einfluss auf die Positioniergenauigkeit im Stapel hat. Hierbei ist der Verfahrensablauf gegebenenfalls durch eine Positionierung der Werkzeugkomponenten auf die jeweilige, dann zu vermessende, Intermittierungslücke anzupassen.

### **Vergleich Zweifaches Z-Falten - Einzelblattstapeln**

Im Folgenden wird abschließend ein Vergleich der Verfahren Zweifaches Z-Falten und Einzelblattstapeln durchgeführt. Der Vergleich erfolgt anhand der in Kapitel 2.3.2 aufgeführten Kriterien für Stapelbildungsverfahren.

- **Materialschonende Verarbeitung:** Die materialschonende Verarbeitung ist beim Zweifachen Z-Falten, wie zuvor diskutiert, gegeben. Aufgrund der Tatsache, dass beim Einzelblattstapeln materialschonende Greifer eingesetzt werden können, sind die Verfahren in diesem Punkt als gleichwertig zu betrachten.
- **Partikelfreiheit:** Beim Zweifachen Z-Falten werden keine partikelbildende Verfahrensschritte benötigt. Da beim Einzelblattstapeln eine Konfektionierung der Materialbahnen zu Einzelblättern durchzuführen ist, bei welcher Partikel entstehen können und eine Gratbildung möglich ist, weist das Zweifache Z-Falten hier Vorteile auf.
- **Positioniergenauigkeit:** Im Rahmen dieser Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass eine prinzipielle Positionierung der beschichteten Bereiche zueinander beim Zweifachen Z-Falten möglich ist. Die Positioniergenauigkeit ist hierbei unter anderem allerdings abhängig von der Genauigkeit der Beschichtung, also der Genauigkeit bei der Herstellung der Intermittierungslücken. So wirken sich Ungenauigkeiten in der Breitenabmessung der Intermittierungslücken direkt auf die Genauigkeit der Position der Aktivmaterialbereiche im Stapel aus. Als Kompensationsmaßnahme könnten Sensoren zur Detektion der Intermittierungslückenbreiten und eine entsprechend genaue Aktuatorik der Faltungskomponenten eingesetzt werden, sodass sich der nichtbeschichtete Materialbereich in der Richtungsumkehr in Abhängigkeit der zuvor detektierten Intermittierungslückenbreite ausbildet. Allerdings ist dies hinsichtlich Anlageninvest und Prozessgeschwindigkeit nachteilig. Daher setzt sich die Positioniergenauigkeit beim Zweifachen Z-

Falten aus der Werkzeug- bzw. Anlagenungenauigkeit und der Intermittierungs-lückenbreitungenungenauigkeit zusammen. Beim Einzelblattstapeln ist die Positioniergenauigkeit unabhängig von der Beschichtungsgenauigkeit, sodass die Ungenauigkeiten hierbei im Wesentlichen durch die Anlagenungenauigkeit resultiert. Da durch eine entsprechende Auswahl von Handhabungskomponenten, Greifkomponenten und Vermessungskomponenten eine sehr hohe Genauigkeit beim Einzelblattstapeln realisiert werden kann, ist das Einzelblattstapeln bezüglich Positioniergenauigkeit vorteilhaft.

- Unabhängigkeit von Aktivmaterialparametern: die Unabhängigkeit des Verfahrensablaufs beim Zweifachen Z-Falten wurde zuvor dargestellt. Da die Handhabungstechnik ebenfalls im Wesentlichen unabhängig von den Aktivmaterialparametern ist und das Konfektionieren durch Anpassung der Prozessparameter auf sich ändernde Aktivmaterialparameter einstellbar ist, bspw. durch Änderung der Schweißparameter beim Laserschneiden zum Konfektionieren von Einzelblättern, sind die beiden Verfahren hinsichtlich dieses Kriteriums als gleichwertig anzusehen.
- Taktzeit: Basierend auf den Erkenntnissen zur technischen Machbarkeit beim Zweifachen Z-Falten wird eine nachfolgende Industrialisierung des Prozesses die Anzahl der Einzelschritte nicht wesentlich reduzieren können. Die Materialbahn ist kontinuierlich ausgeführt, der Verfahrensablauf sieht jedoch sequenzielle Einzelschritte vor. Begründet durch die Anzahl dieser Einzelschritte und der Tatsache, dass aufgrund der Bauraumsituation bei der Ablage auf dem Stapel keine vollständige zeitliche Parallelisierung der zeitaufwendigen Herstellung der Richtungsumkehr von Anode und Kathode möglich ist, ist die Prozessabfolge des Zweifachen Z-Faltens nachteilig gegenüber der Prozessabfolge beim Einzelblattstapeln. Beim Einzelblattstapeln können die notwendigen Prozessschritte teilweise parallelisiert werden. Beispielsweise kann das zeitaufwendige Konfektionieren inkl. Reinigen von Anoden-, Kathoden- und Separatoreinzelblättern zeitlich parallel durchgeführt werden. Daher weist das Einzelblattstapeln Vorteile bei der Taktzeit auf.
- Aktivmaterialausnutzung: Beim Zweifachen Z-Falten können die Aktivmaterialien vollumfänglich im Stapel verbaut werden, sodass eine vollständige Ausnutzung möglich ist. Beim Einzelblattstapeln entsteht beim Konfektionieren in der Regel

ein Aktivmaterialgitterrest, welches nicht im Stapel verbaut werden kann. Daher weist in dieser Hinsicht das Zweifache Z-Falten einen Vorteil auf.

Hinsichtlich des Stapeldesigns weist ein Stapel aus Einzelblättern Vorteile bei der Energiedichte gegenüber einem Zweifachen Z-Falten-Stapel auf. Dies ist in erster Linie durch die Verwendung einer einseitig beschichteten Kathode beim Zweifachen Z-Falten begründet. Der Einzelblattstapel hingegen hat sowohl bei Kathode als auch Anode eine doppelseitige Beschichtung. Durch die einseitige Beschichtung ist beim Zweifachen Z-Falten-Stapel der Anteil des Stromsammlers der Kathode (in der Regel Aluminiumfolie) im Stapel erhöht und somit nachteilig. Theoretisch könnte eine Reduktion der Dicke des Stromsammlers dem entgegenwirken, da aufgrund der geringeren notwendigen Stromtragfähigkeit auch eine Dickenreduktion möglich sein sollte, sofern dies verfahrenstechnisch bei der Beschichtung, Trocknung, Kalandrieren realisierbar ist. Aufgrund der Tatsache, dass ein Stapel des Zweifachen Z-Faltens inaktive Bereiche benötigt – für die Richtungsumkehr der Materiabahnen – und diese Bereiche bei einem Einzelblattstapel nicht notwendig sind, wird auch bei einer Reduktion der Dicke des Kathodenstromsammlers der Einzelblattstapel eine höhere Energiedichte aufweisen.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

### 9.1 Zusammenfassung

Die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs in der Automobilindustrie sowie die Realisierung der Energiewende erfordern leistungsfähige Energiespeicher. Hierfür weisen elektrochemische Energiespeicher, insbesondere Li-Ionen-Batterien, großes Potential auf. Eine zentrale Herausforderung bei der Herstellung von großformatigen Li-Ionen-Batteriezellen ist die Stapelbildung, die wechselnde Anordnung von Anode, Separator und Kathode. Die Stapelbildungsverfahren haben maßgeblichen Einfluss auf die realisierbaren Stapeldesigns und damit auf die Eigenschaften einer Batteriezelle. Ein Batteriezellstapel, welcher mit gestapelten Einzelblättern aufgebaut ist, weist die besten Eigenschaften derzeitiger großformatiger Batteriezellen auf. Nachteilig ist bei diesem Stapeldesign jedoch, dass bei den zum Einsatz kommenden Stapelbildungsverfahren durch die Konfektionierung der Elektronenbahnen zu Einzelblättern Schneidpartikel erzeugt werden und zudem Stanzgitterreste aus kostenintensiven Elektrodenflächen erzeugt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein Stapeldesign konzipiert, welches die positiven Eigenschaften einer einzelblattgestapelten Zelle aufweist und gleichzeitig aus kontinuierlichen Materialbahnen besteht, sodass eine maximale Elektrodenflächenausnutzung der Materialbahnen erzielt werden kann und keine Konfektionierung der Elektrodenflächen erforderlich ist. Als Kern dieser Arbeit wurde ein Verfahrensablauf für die Herstellung des definierten Stapeldesigns konzipiert. Hierbei stand die 180°-Formung der Materialbahn inklusive deren Ablage auf dem bereits gebildeten (Teil-)Stapel im Mittelpunkt.

Für die systematische Ausarbeitung wurde zunächst ein Stapeldesign konzipiert, welches die Zielkriterien erfüllt. Zielkriterien sind die eindeutige gegenüberliegende Anordnung der Aktivflächen der Elektroden, eine homogene Flächenpressung sowie die Möglichkeit der gleichmäßigen Ausdehnung der Aktivflächen der Elektroden. Des Weiteren sind ausschließlich kontinuierliche Materialbahnen einzusetzen und auf Konfektionierprozesse zu verzichten, sodass die Aktivflächen der Ausgangsmaterialbahnen zu 100 % im Stapel verbaut werden können. Zudem sind weitere Zielkriterien die Unabhängigkeit des Stapeldesigns von den mechanischen Eigenschaften der Aktivmaterialien sowie das Aufweisen einer rechteckigen Grundfläche des Stapels.

Anschließend wurden für die Definition eines geeigneten Produktionsablaufes zur Herstellung des konzipierten Stapeldesign die Wirkzusammenhänge der Stapelbildung qualitativ beleuchtet. Als zentraler Einfluss konnte die Materialbahnformung um 180° mit der Ablage auf den bereits gebildeten Stapel identifiziert werden, daher wurden potenzielle Verfahren für die Realisierung dieses Prozessschrittes tiefergehend analysiert.

Aufgrund der Tatsache, dass keines der analysierten Verfahren unmittelbar angewandt werden kann, wurde ein neuer Verfahrensablauf entwickelt. Hierfür wurde zunächst der Verfahrensablauf in einzelne Prozessschritte untergliedert. Für diese Prozessschritte wurden parametrisierte Materialbahnverläufe erstellt. Die Parametrisierungen wurden auf einen konkreten Stapel angewandt und unter Verwendung eines Genetischen Algorithmus optimiert.

Für die Erzeugung der definierten Materialbahnverläufe wurden im Anschluss Komponenten für die Materialbahnzuführung sowie die Materialbahnformung konstruiert, sodass abschließend eine prototypische Umsetzung durchgeführt und die grundsätzliche Prinzipfähigkeit des neuen Verfahrensablaufes mit den dazugehörigen Komponenten aufgezeigt werden konnte.

Abschließend wurden die erzielten Ergebnisse diskutiert.

## **9.2 Ausblick**

Ausgehend vom konzipierten Verfahrensverlauf sollten zukünftige Arbeiten die Möglichkeiten für dessen industriellen Einsatzes erarbeiten, insbesondere sollte hierbei die Taktzeit für den Stapelbau adressiert werden. Des Weiteren sollte eine Anlage entwickelt werden, welche verschiedene Zellstapelabmessungen realisieren kann. Eine Möglichkeit stellt hierbei der Wechsel der für den Materialbahnformungsvorgang benötigten Maschinenkomponenten dar, eine weitere Möglichkeit besteht durch die Konzeptionierung veränderbarer Komponenten. Bei diesen Werkzeugen würde zudem die Möglichkeit der Integration von Sensorik bestehen, welche beispielsweise für eine kontinuierliche Qualitätskontrolle der Stapelgenauigkeit verwendet werden könnte. Mit einer entsprechenden Sensorik und Aktorik würde zudem das Potenzial geschaffen, durch eine Positions- oder/und Komponentenkonturveränderung bestehende Schwankungen in der Intermittierungslücke der Beschichtung auszugleichen. Dieser Ausgleich könnte bei der 180°-Materialbahnformung erfolgen, bei welcher die Faltungparameter

entsprechend auf die detektierten Änderungen der Beschichtung angepasst werden. Damit würde sich der nichtbeschichtete Bereich der Materialbahnformung verändern, und somit würden sich die Beschichtungskanten trotz veränderter Beschichtungslücke überdecken. Eine weitere Funktionalität, welche in eine Stapelbildungsanlage integriert werden könnte, ist das Verschweißen der Ableiterbereiche, sodass unmittelbar ein fixierter Stapel hergestellt werden kann, ohne dass ein Stapel durch zusätzliche Prozessschritte von der Stapelbildung bis zur Fixierung gehandhabt werden müsste.

Zukünftige Arbeiten könnten die erarbeitete Basis des konzipierten Verfahrensablauf für die Richtungsumkehr von kontinuierlichen Materialbahnen aufgreifen und diese beispielsweise auf das Z-Falten mit Einzelblättern übertragen, sodass dabei die kontinuierliche Separatormaterialbahn entsprechend verarbeitet wird.



## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 2-1 Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen Batteriezelle<br>(Korthauer 2013, S. 15)                          | 3  |
| Abbildung 2-2: Ausgewählte Versagensmechanismen der Anode<br>(in Anlehnung an (Vetter & Novak et al. 2005, S. 269))      | 7  |
| Abbildung 2-3 Alterungsvorgänge auf der Kathode nach<br>(Leuthner 2013, S. 18)   | 8  |
| Abbildung 2-4 Schematisches Batteriesystem<br>(Tornow & Graubohm et al. 2016, S. 425)                                    | 9  |
| Abbildung 2-5 Typische Aufbauarten Rundzelle, prismatische Hard-Case-Zelle<br>und Pouch-Zelle nach (Schmitt 2015, S. 32) | 10 |
| Abbildung 2-6 Hauptvorteile der Zellbauformen in Anlehnung an<br>(Kampker 2014, S. 55)                                   | 12 |
| Abbildung 2-7 Prozesskette zur Elektrodenherstellung<br>(nach (Kampker 2014, S. 61))                                     | 13 |
| Abbildung 2-8 Verschiedene Beschichtungsmuster   | 14 |
| Abbildung 2-9 Prozessschritte beim Zusammenbau einer Pouch-Zelle<br>in Anlehnung an (Kampker 2014, S. 68)                | 15 |
| Abbildung 2-10 Prozessschritte zum Aktivieren der Zelle in Anlehnung an<br>(Kampker 2014, S. 78)                         | 18 |
| Abbildung 2-11 Stapeldesignkriterien   | 21 |
| Abbildung 2-12 Anforderungen Stapelbildungsverfahren   | 22 |
| Abbildung 2-13 Übersicht Stapelbildungsverfahren   | 24 |
| Abbildung 2-14 Einzelblattstapelbildung  | 26 |
| Abbildung 2-15 Bewertung Einzelblattstapeln  | 28 |
| Abbildung 2-16 Z-Falten  | 29 |
| Abbildung 2-17 Bewertung Z-Falten  | 31 |
| Abbildung 2-18 Z-Falten mit Einzelblättern   | 32 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 2-19 Bewertung Z-Falten mit Einzelblättern                                      | 34 |
| Abbildung 2-20 Rundwickeln  | 35 |
| Abbildung 2-21 Bewertung Rundwickeln  | 36 |
| Abbildung 2-22 Flachwickeln   | 37 |
| Abbildung 2-23 Bewertung Flachwickeln   | 39 |
| Abbildung 2-24 Stackwinding   | 40 |
| Abbildung 2-25 Bewertung Stackwinding   | 41 |
| Abbildung 3-1 Grafische Darstellung der Vorgehensweise                                    | 47 |
| Abbildung 4-1 Vorgehensweise Kapitel 4  | 49 |
| Abbildung 4-2 Kriterien Stapeldesign  | 51 |
| Abbildung 4-3 Lösungsmöglichkeiten Stapeldesign   | 52 |
| Abbildung 4-4 Lösungsauswahl Konzept Einseitiges Z-Falten mit Intermittierungslücke       | 54 |
| Abbildung 4-5 Konzept 1: Einseitiges Z-Falten mit Intermittierungslücke                   | 54 |
| Abbildung 4-6 Lösungsauswahl Konzept Flachwickel mit sich ändernder Intermittierungslücke | 55 |
| Abbildung 4-7 Konzept 2: Flachwickel mit sich ändernder Intermittierungslücke             | 56 |
| Abbildung 4-8 Lösungsauswahl Konzept Zweifaches Z-Falten                                  | 57 |
| Abbildung 4-9 Konzept 3: Zweifaches Z-Falten  | 58 |
| Abbildung 4-10 Bewertung Konzepte Stapeldesign  | 59 |
| Abbildung 5-1 Vorgehensweise Kapitel 5  | 62 |
| Abbildung 5-2 Kriterien für Stapelbildungsverfahren                                       | 63 |
| Abbildung 5-3 Ausgangsmaterialbahnen und Stapeldesign                                     | 65 |
| Abbildung 5-4 Ausgangsanordnung Stapelbildung   | 66 |
| Abbildung 5-5 Anordnung 1 Stapelbildung   | 67 |
| Abbildung 5-6 Anordnung 2 Stapelbildung   | 68 |
| Abbildung 5-7 Anordnung 3 Stapelbildung   | 69 |

---

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 5-8 Anordnung 4 Stapelbildung   | 70 |
| Abbildung 5-9 Stapelbildungsablagereihenfolge   | 71 |
| Abbildung 5-10 Einflüsse auf die Stapelbildung  | 73 |
| Abbildung 5-11 Übergeordnete Parametergruppen   | 73 |
| Abbildung 5-12 Gruppen der Stapelbildung  | 74 |
| Abbildung 5-13 Komponentengruppen der Materialförderung                                 | 75 |
| Abbildung 5-14 Materialbahnablage   | 76 |
| Abbildung 5-15 Betrachtete Materialeigenschaften  | 76 |
| Abbildung 5-16 Qualitative Zusammenhänge der Funktionsgruppen                           | 77 |
| Abbildung 5-17 Matrix-Vergleich der Zusammenhänge der Funktionsgruppen                  | 78 |
| Abbildung 5-18 Ur- und Zielzustand 180°-Richtungsumkehr                                 | 80 |
| Abbildung 5-19 Geometrische Randbedingungen der Formung                                 | 83 |
| Abbildung 5-20 Z-Falten nach (Kurfer & Westermeier et al. 2012b)                        | 85 |
| Abbildung 5-21 Separatorfaltung nach (Schröder & Glodde et al. 2015, S. 25)             | 87 |
| Abbildung 5-22 Übersicht der Verfahren des Biegeumformens<br>(DIN 8586:2003-09, S. 11)  | 88 |
| Abbildung 5-23 Freies Biegen nach (DIN 8586:2003-09, S. 3)                              | 89 |
| Abbildung 5-24 Gesenkbiegen nach (DIN 8586:2003-09, S. 4)                               | 90 |
| Abbildung 5-25 Schwenkbiegen nach (DIN 8586:2003-09, S. 9)                              | 91 |
| Abbildung 5-26 Streckziehen über einen Formblock nach<br>(Fritz & Schulze 2015, S. 483) | 92 |
| Abbildung 5-27 180°-Biegen nach (Schaub 1980, S. 45)                                    | 93 |
| Abbildung 5-28 Falzen nach (Liewald & Hönle et al. 2013, S. 5)                          | 94 |
| Abbildung 5-29 Taschenfalzprinzip nach (Zimmer 2008, S. 8)                              | 95 |
| Abbildung 5-30 Schwertfalzen nach (Hafner & Dörsam 2011, S. 19)                         | 96 |
| Abbildung 5-31 Trichterfalzen nach (Zimmer 2008, S. 9)                                  | 97 |
| Abbildung 5-32 Trommelfalzen nach (Hafner & Dörsam 2011, S. 21)                         | 97 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 6-1 Vorgehensweise Kapitel 6  | 101 |
| Abbildung 6-2 Abgeleiteter Anfangs- und Endzustand  | 103 |
| Abbildung 6-3 Merkmale und Lösungsprinzipien für die Formung  | 104 |
| Abbildung 6-4 Verfahrensablauf zur Materialbahnformung  | 105 |
| Abbildung 6-5 Schritt 1 „Erste Werkzeuggebundene Formung“<br>Ausgangs- und Zielsituation                        | 106 |
| Abbildung 6-6 Vektoren  | 107 |
| Abbildung 6-7 Ausgangs- und Zielsituation Schritt 4<br>„Ablegende Werkzeuggebundene Formung“                    | 109 |
| Abbildung 6-8 Koordinatensystem   | 110 |
| Abbildung 6-9 Materialbahnverlauf   | 112 |
| Abbildung 6-10 Arbeitsbereiche Schritt 1<br>„Erste Werkzeuggebundene Formung“                                   | 114 |
| Abbildung 6-11 Sicherungsbereiche in Schritt 2 „Materialbahn sichern“   | 115 |
| Abbildung 6-12 Ausgangs- und Zielmaterialbahnverlauf Schritt 4 „Ablegende<br>Werkzeuggebundene Formung“         | 117 |
| Abbildung 6-13 Gemeinsame Fixpunkte der Materialbahnverläufe  | 118 |
| Abbildung 6-14 Integration Richtungsänderung in den Materialbahnverlauf   | 119 |
| Abbildung 6-15 Parametrisierter Materialbahnverlauf Schritt 1 „Erste<br>Werkzeuggebundene Formung“              | 121 |
| Abbildung 6-16 Parametrisierter Materialbahnverlauf Schritt 4 „Ablegende<br>Werkzeuggebundene Formung“          | 122 |
| Abbildung 6-17 Winkelbeziehungen Krümmungsabschnitt $\gamma$ Schritt 4<br>„Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ | 124 |
| Abbildung 6-18 Zusammenhänge Punkt PE Schritt 1<br>„Erste Werkzeuggebundene Formung“                            | 125 |
| Abbildung 6-19 Zusammenhänge Schritt 4 „Ablegende Werkzeuggebundene<br>Formung“                                 | 126 |
| Abbildung 6-20 Intermittierungslückenbreiten  | 127 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 6-21 Begrifflichkeiten Genetischer Algorithmus<br>nach (Koch 2014, S. 61)  | 131 |
| Abbildung 6-22 Ablaufplan eines Genetischen Algorithmus in Anlehnung an<br>(Buttelmann & Lohmann 2004, S. 153)                                   | 132 |
| Abbildung 6-23 Rekombination mit einem Kreuzpunkt nach<br>(Koch 2014, S. 80)   | 133 |
| Abbildung 6-24 Uniform Crossover   | 134 |
| Abbildung 6-25 Mutation Operationen nach (Koch 2014, S. 85)  | 134 |
| Abbildung 7-1 Vorgehensweise Kapitel 7   | 136 |
| Abbildung 7-2 Abmessungen Anode  | 137 |
| Abbildung 7-3 Verlauf Optimierung mittels GA   | 139 |
| Abbildung 7-4 Optimierte Materialbahnverläufe der Schritte 1 „Erste<br>Werkzeuggebundene Formung“ und 4<br>„Ablegende Werkzeuggebundene Formung“ | 141 |
| Abbildung 7-5 Komponentenposition Schritt 1<br>„Erste Werkzeuggebundene Formung“   | 142 |
| Abbildung 7-6 Komponentenpositionen Schritt 2 „Materialbahn sichern“   | 143 |
| Abbildung 7-7 Komponentenpositionen Schritt 4<br>„Ablegende Werkzeuggebundene Formung“   | 144 |
| Abbildung 7-8 Komponentenposition Schritt 5 „Finale Materialbahnsicherung“   | 145 |
| Abbildung 7-9 Aktivität der Komponenten während des Prozessablaufs   | 145 |
| Abbildung 7-10 Physikalische Wirkprinzipien nach (Hesse 2012, S. 10)   | 147 |
| Abbildung 7-11 Sichern Position 1  | 148 |
| Abbildung 7-12 Sichern Position 4  | 149 |
| Abbildung 7-13 Sichern Position 7  | 150 |
| Abbildung 7-14 Mechanismen der Drapierung nach (Wagner 2015, S. 22)  | 151 |
| Abbildung 7-15 Bewegen Positionen 5 und 6  | 153 |
| Abbildung 7-16 Bewertung Mechanismen für Positionen 5 und 6  | 154 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 7-17 Komponenten über den gesamten Schrittverlauf  | 156 |
| Abbildung 7-18 Mögliche Verweildauer der Komponenten   | 157 |
| Abbildung 7-19 Konzept 1 Komponentenanzahl   | 158 |
| Abbildung 7-20 Konzept 2 Komponentenanzahl   | 160 |
| Abbildung 7-21 Bewegungsarten der Komponenten  | 162 |
| Abbildung 7-22 Komponente 1  | 163 |
| Abbildung 7-23 Komponente 2  | 164 |
| Abbildung 7-24 Stempelsystem   | 164 |
| Abbildung 7-25 Elastische Stempel  | 165 |
| Abbildung 7-26 Komponente 7  | 166 |
| Abbildung 7-27 Formungskomponenten   | 166 |
| Abbildung 7-28 Übersicht Materialbahnzuführung   | 167 |
| Abbildung 7-29 Konzepte zur Erzeugung konstanter Bahnspannung<br>in Anlehnung an (Kiel 2007, S. 392) und (Weidauer 2013, S. 265) | 169 |
| Abbildung 7-30 Materialbahnverlauf   | 171 |
| Abbildung 7-31 Steuerungsarchitektur   | 173 |
| Abbildung 7-32 Bedienoberfläche Tablet   | 174 |
| Abbildung 7-33 Materialbahnförderung   | 175 |
| Abbildung 7-34 Komponenten der Materialbahnförderung   | 176 |
| Abbildung 7-35 Komponentenkonturen (links),<br>Achsen von Komponente 2 (rechts)  | 177 |
| Abbildung 7-36 Realisierte Stempeltechnologie  | 178 |
| Abbildung 7-37 Stempelabfolge Anodenmaterialbahn   | 179 |
| Abbildung 7-38 Entfernen Stempel Anodenmaterialbahn  | 179 |
| Abbildung 7-39 Konturlänge Komponente 2  | 180 |
| Abbildung 7-40 Konturlänge Komponente 1  | 181 |
| Abbildung 7-41 Stempelabfolge Separatorbahn  | 182 |

Abbildung 8-1 Vorgehensweise Kapitel 8

184

## **Tabellenverzeichnis**

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 2-1 Anoden-Aktivmaterial                          | 4   |
| Tabelle 2-2 Kathoden-Aktivmaterial                        | 5   |
| Tabelle 6-1 Parameter der Bahnverläufe Schritt 1 und 4    | 128 |
| Tabelle 7-1 Zelldesignparameter                           | 137 |
| Tabelle 7-2 Wertebereich der Materialbahnverlaufparameter | 138 |
| Tabelle 7-3 Optimierte Materialbahnverlaufparameter       | 140 |

## Literaturverzeichnis

(A\_Gehrig 2017)

A\_Gehrig, T. (2017), *Entwicklung eines modularen Steuerungssystems am Beispiel einer Tänzer-Lageregelung zur automatisierten Lithium-Ionen Zell-Fertigung*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Salem 2017)

A\_Salem, A. B. (2017), *Entwicklung eines Tools für eine parametrisierte Modellierung des Materialbahnverlaufs bei der Stapelung von Elektroden von Lithium-Ionen-Zellen*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Weller 2016)

A\_Weller, D. (2016), *Entwicklung und Realisierung eines Steuerungs- und Regelungssystems für die Lithium-Ionen Zell-Fertigung*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Aydemir & Bach et al. 2015)

Aydemir, M.; Bach, G.; Schröder, R.; Glodde, A. & Seliger, G. (2015), „Handhaben von Elektrodenfolien. Substitution von Greifprozessen durch ein Konzept zur durchsatzgesteigerten Handhabung“, *wt Werkstatttechnik online, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf*, 105 (9-2015), S. 591–596.

(Bach & Schuster et al. 2016)

Bach, T. C.; Schuster, S. F.; Fleder, E.; Müller, J.; Brandt, M. J.; Lormann, H.; Jossen, A. & Sextl, G. (2016), „Nonlinear aging of cylindrical lithium-ion cells linked to heterogeneous compression“, *Journal of Energy Storage*, 5, S. 212–223.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2016.01.003> [10.12.2019].

(Baumeister 2017)

Baumeister, M. (2017), *Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion*. Dissertation, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), SHAKER Verlag, Düren. ISBN: 978-3-8440-5512-2.

(Baumeister & Fleischer 2014)

Baumeister, M. & Fleischer, J. (2014), „Integrated cut and place module for high

productive manufacturing of lithium-ion cells“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) , S. 5–8. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.063> [10.01.2020].

(Baumeister & Haag et al. 2013)

Baumeister, M.; Haag, S. & Fleischer, J. (2013), *EP3069404B1 Electrode assembly, method for the production thereof, and electrochemical cell*, European Patent Office München.

(Bhattacharyya & Key et al. 2010)

Bhattacharyya, R.; Key, B.; Chen, H.; Best, A. S.; Hollenkamp, A. F. & Grey, C. P. (2010), „In situ NMR observation of the formation of metallic lithium microstructures in lithium batteries“, *Nature materials*, 9 , 504–510 (2010).  
<https://doi.org/10.1038/nmat2764> [05.11.2019].

(Bitsch & Willenbacher et al. 2015)

Bitsch, B.; Willenbacher, N.; Wenzel, V.; Schmelzle, S. & Nirschl, H. (2015), „Einflüsse der mechanischen Verfahrenstechnik auf die Herstellung von Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien“, *Chemie Ingenieur Technik*, 87 (4), S. 466–474.  
<https://doi.org/10.1002/cite.201400093> [01.02.2020].

(Blechtschmidt 2013)

Blechtschmidt, J. (Hrsg.) (2013), *Papierverarbeitungstechnik*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. ISBN: ISBN 978-3-446-43071-6.

(Bockwinkel & Dröder et al. 2016)

Bockwinkel, K.; Dröder, K. & Dietrich, F. (2016), „Design of an Automated System for the Evaluation of Materials for Battery Research“, *Procedia CIRP*, 44 , S. 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.083> [01.04.2019].

(Borchard-Tuch 2003)

Borchard-Tuch, C. (2003), „Lithium-Ionen-Akkus“, *Chemie in unserer Zeit* (Volume 37 Issue 6), S. 436–437. <https://doi.org/10.1002/ciuz.200390091> [03.12.2019].

(Buttelmann & Lohmann 2004)

Buttelmann, M. & Lohmann, B. (2004), „Optimierung mit Genetischen Algorithmen und eine Anwendung zur Modellreduktion“, *at – Automatisierungstechnik/ Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, 52 , S. 151–163. <https://doi.org/10.1524/auto.52.4.151.29416> [04.11.2019].

(DIN 8580:2003-09)

DIN 8580:2003-09 (2003), *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*, Beuth-Verlag, Berlin.

(DIN 8585-4:2003-09)

DIN 8585-4:2003-09 (2003), *Fertigungsverfahren Zugumformen - Teil 4: Tiefen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth-Verlag, Berlin.

(DIN 8586:2003-09)

DIN 8586:2003-09 (2003), *Fertigungsverfahren Biegeumformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth-Verlag, Berlin.

(DIN 8593-0:2003-09)

DIN 8593-0:2003-09 (2003), *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth-Verlag, Berlin.

(DIN 8593-3:2003-09)

DIN 8593-3:2003-09 (2003), *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 3: Anpressen, Einpressen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth-Verlag, Berlin.

(DIN 8593-5:2003-09)

DIN 8593-5:2003-09 (2003), *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth-Verlag, Berlin.

(Doege & Behrens 2010)

Doege, E. & Behrens, B.-A. (2010), *Handbuch Umformtechnik*, Springer-Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-642-04249-2.

(Ebert & Roscher et al. 2014)

Ebert, L.; Roscher, M. A. & Wolter, M. (2014), „Schnellere Serienproduktion von Lithium-Ionen-Batterien“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 116 (4), S. 60–63. <http://dx.doi.org/10.1007/s35148-014-0383-5> [05.11.2019].

(Ehinger & Reinhart 2014)

Ehinger, C. & Reinhart, G. (2014), „Robot-based automation system for the flexible preforming of single-layer cut-outs in composite industry“, *Production Engineering*, 8, S. 559–565. <https://doi.org/10.1007/s11740-014-0546-y> [07.01.2020].

(FESTO 2020)

FESTO (2020), *Proportional-Druckregelventil. Operating instructions*, Festo AG &

Co. KG. [https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/405927/VPPM-\\_C1\\_2007-03\\_698754d2.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/405927/VPPM-_C1_2007-03_698754d2.pdf) [10.02.2020].

(Fleischer & Singer et al. 2015)

Fleischer, J.; Singer, R. & Langknecht, F. (2015), „Tiefgezogene Verpackungen von Lithium-Ionen-Pouchzellen“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 110, S. 730–733. <https://doi.org/10.3139/104.111432> [16.02.2018].

(Fritz & Schulze 2015)

Fritz, H. & Schulze, G. (Hrsg.) (2015), *Fertigungstechnik*, Springer, Berlin. ISBN: 978-3-662-46554-7.

(Glodde & Aydemir et al. 2016)

Glodde, A.; Aydemir, M.; Schröder, R. & Seliger, G. (2016), „Produktivitätsgesteigerte Zellverbundherstellung“, *wt Werkstattstechnik online, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf*, 106 (09), S. 583–587.

(Graf 2012)

Graf, M. (2012), „CFRP- Advancements in the fully automated preform process for complex parts.“, *DIEFFENBACHER Preform Technology, Troy, Michigan, USA* .

(Haag & Fleischer 2016)

Haag, S. & Fleischer, J. (2016), „Kontinuierliches Stapelverfahren für Li-Ion-Zellen. Entwicklung eines kontinuierlichen Verfahrens für die Stapelbildung von Lithium-Ionen-Pouchzellen“, *wt Werkstattstechnik online, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf*, 106 (2016), S. 559–562.

(Hafner & Dörsam 2011)

Hafner, S. & Dörsam, E. (2011), *8. Druckweiterverarbeitung. Vorlesung Drucktechnik*. Technische Universität Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren. <https://docplayer.org/23225771-Fachvortrag-inline-veredelung.html> [10.01.2020].

(Haselrieder & Ivanov et al. 2013)

Haselrieder, W.; Ivanov, S.; Christen, D. K.; Bockholt, H. & Kwade, A. (2013), „Impact of the Calendering Process on the Interfacial Structure and the Related Electrochemical Performance of Secondary Lithium-Ion Batteries“, *ECS - The Electrochemical Society*, 50 (26), S. 59–70. DOI: 10.1149/05026.0059ecst [20.08.2019].

(Heimes & Kampker et al. 2018)

Heimes, H. H.; Kampker, A.; Lienemann, C.; Locke, M.; Offermanns, C.; Michaelis, S. & Rahimzei, E. (2018), *Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezele*, PEM der RWTH Aachen University, Aachen. ISBN: 978-3947920006.

(Herb 2010)

Herb, F. (Mai 2010), *Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen*, Dissertation, Fakultät für Naturwissenschaften der Universität Ulm, Ulm. 10.18725/OPARU-1869 [10.01.2020].

(Hesse 2012)

Hesse, S. (2012), *Greifertechnik. Effektoren für Roboter und Automaten*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 978-3-446-42422-7.

(Hoffmann & Neugebauer et al. 2012)

Hoffmann, H.; Neugebauer, R. & Spür, G. (2012), *Handbuch Umformen. Edition | Handbuch der Fertigungstechnik*, Hanser Verlag, München. ISBN: 978-3-446-42778-5.

(Holl & Schreiber et al. 2014)

Holl, K.; Schreiber, W.; Pompetzki, M.; Schebesta, S. & Huth, A. (2014), *Schlussbericht des Fördervorhabens: Entwicklung einer Fertigungsmethodik für neuartige Hochenergiebatteriezellen zur Erprobung der Technologie für eine spätere Großserienfertigung in Deutschland (Li-FeM)*, Techn. Informationsbibl. und Univ.-Bibl. <https://doi.org/10.2314/GBV:838558143> [02.02.2020].

(Holland 1975)

Holland, J. H. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems. An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, United States. ISBN: 9780472084609.

(Hornbogen & Eggeler et al. 2017)

Hornbogen, E.; Eggeler, G. & Werner, E. (2017), *Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-642-53866-7.

(Kaiser & Wenzel et al. 2014)

Kaiser, J.; Wenzel, V.; Nirschl, H.; Bitsch, B.; Willenbacher, N.; Baunach, M.; Schmitt, M.; Jaiser, S.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2014), „Prozess- und Produktentwicklung von Elektroden für Li-Ionen-Zellen“, *Chemie Ingenieur Technik*, 86 (5), S. 695–706. <https://doi.org/10.1002/cite.201300085> [19.12.2018].

(Kampker 2014)

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

(Kampker & Hohenthanner et al. 2013)

Kampker, A.; Hohenthanner, C.-R.; Deutskens, C.; Heimes, H. H. & Sesterheim, C. (2013), „Fertigungsverfahren von Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, S. 237–248.

(Kehrwald & Shearing et al. 2011)

Kehrwald, D.; Shearing, P.; Brandon, N.; Sinha, P. & Harris, S. (2011), „Local Tortuosity Inhomogeneity in a Lithium Battery Composite Electrode“, *Journal of the Electrochemical Society*, 158, S. 1393–1399. DOI: 10.1149/2.079112jes [14.01.2020].

(Ketterer B. & Karl et al. 2009)

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

(Kiel 2007)

Kiel, E. (Hrsg.) (2007), *Antriebslösungen. Mechatronik für Produktion und Logistik*, Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-73425-3.

(Kim & Yum et al. 2011)

Kim, T. H.; Yum, J.; Hu, S. J.; Spicer, J. P. & Abell, J. A. (2011), „Process robustness of single lap ultrasonic welding of thin, dissimilar materials“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60 (1), S. 17–20. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.016> [21.10.2019].

(Kirchhoff 2013)

Kirchhoff, M. (2013), „Laser Applications in Battery Production. From Cutting Foils to Welding the Case“, *3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Nürnberg, Deutschland, S. 1–3. 10.1109/EDPC.2013.6689743 [30.10.2019].

(Knoche & Surek et al. 2016)

Knoche, T.; Surek, F. & Reinhart, G. (2016), „A Process Model for the Electrolyte Filling of Lithium-ion Batteries“, *Procedia CIRP*, 41, S. 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.044> [18.08.2019].

(Koch 2014)

Koch, S. (2014), *Genetische Algorithmen für das Order Batching-Problem in manuellen Kommissioniersystemen*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05346-8.

(Koo 2012)

Koo, R. (2012), *LG Chem: Advanced Li-Ion Polymer Battery Cell Manufacturing Plant in USA*. [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/ar-ravt001\\_es\\_koo\\_2012\\_p.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/ar-ravt001_es_koo_2012_p.pdf) [10.02.2020].

(Korthauer 2013)

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

(Kurfer & Westermeier et al. 2012a)

Kurfer, J.; Westermeier, M. & Reinhart, G. (2012), „Cell stacking process of high-energy lithium-ion cells“, *Technologies and Systems for Assembly Quality, Productivity and Customization. Ann Arbor, 20.-22.05.2012.*, 61, S. 33–37.

(Kurfer & Westermeier et al. 2012b)

Kurfer, J.; Westermeier, M.; Tammer, C. & Reinhart, G. (2012), „Production of large-area lithium-ion cells. Preconditioning, cell stacking and quality assurance“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61 (1), S. 1–4. 10.1016/j.cirp.2012.03.101 [04.02.2020].

(Kurzweil & Dietlmeier 2015)

Kurzweil, P. & Dietlmeier, O. K. (2015), *Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-10900-4.

(Leuthner 2013)

Leuthner, S. (2013), „Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, S. 13–20.

(Liewald & Hönle et al. 2013)

Liewald, M.; Hönle, S. & Sindel, M. (2013), *Untersuchung des Kraft- und Energiebedarfs beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen*, UMFORMtechnik, Meisenbach Verlag, Bamberg. [https://www.umformtechnik.net/binary\\_data/3100748\\_untersuchung-des-kraft-und-energiebedarfs-beim-falzen.pdf](https://www.umformtechnik.net/binary_data/3100748_untersuchung-des-kraft-und-energiebedarfs-beim-falzen.pdf) [10.12.2019].

(Linden & Reddy 2011)

Linden, D. & Reddy, T. B. (2011), *Handbook Of Batteries. Third Edition*, MCGRAW-HILL PROFESSIONAL, New York. ISBN: 978-0-07-135978-8.

(Nosrat Nezami & Gereke et al. 2014)

Nosrat Nezami, F.; Gereke, T.; Hübner, M.; Döbrich, O. & Cherif, C. (2014), *Factors of process robustness in multilayer preforming of carbon fibre reinforcements*, ECCM16 - 16TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS, Sevilla, Spanien. <http://www.escm.eu.org/eccm16/assets/0065.pdf> [14.01.2020].

(Papageorgiou & Leibold et al. 2015)

Papageorgiou, M.; Leibold, M. & Buss, M. (2015), *Optimierung*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-662-46936-1.

(Pettinger 2013a)

Pettinger, K.-H. (2013), „Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, S. 221–236.

(Pettinger 2013b)

Pettinger, K.-H. (2013), „Prüfverfahren in der Fertigung“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, S. 259–270.

(Petzl & Kasper et al. 2015)

Petzl, M.; Kasper, M. & Danzer, M. A. (2015), „Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study“, *Journal of Power Sources*, 275 , S. 799–807. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.065> [07.09.2019].

(Rahimzei & Sann et al. 2015)

Rahimzei, E.; Sann, K. & Vogel, M. (2015), *Kompendium: Li-Ionen-Batterien. im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität 2: Smart Car - Smart Grid - Smart Traffic*, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Frankfurt a.M. [http://www.ikt-em.de/\\_media/Kompendium\\_Li-Ionen-Batterien.pdf](http://www.ikt-em.de/_media/Kompendium_Li-Ionen-Batterien.pdf) [11.12.2019].

(Reinhart & Kurfer 2011)

Reinhart, G. & Kurfer, J. (2011), „Handhaben in der Batteriefertigung. Forschungs- und Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen“, *wt Werkstattstechnik online*, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 101 (09), S. 545–550.

(Reinhart & Zeilinger et al. 2013)

Reinhart, G.; Zeilinger, T.; Kurfer, J.; Westermeier, M.; Thiemann, C.; Glonegger, M.; Wunderer, M.; Tammer, C.; Schweier, M. & Heinz, M. (2013), „Research and Demonstration Center for the Production of Large-Area Lithium-Ion Cells“ in *Future Trends in Production Engineering. Proceedings of the First Conference of the German Academic Society for Production Engineering (WGP), Berlin, Germany, 8th-9th June 2011*, Hrsg. G. Schuh, R. Neugebauer & E. Uhlmann, Springer Berlin Heidelberg, S. 3–12. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24491-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24491-9_1).

(Schaub 1980)

Schaub, W. (1980), *Untersuchung der Verfahrensgrenzen beim 180°-Biegen von Fein- und Mittelblechen*, Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-09881-2.

(Schmitt 2015)

Schmitt, J. (2015), *Untersuchungen zum Herstellungsprozess des Elektrode-Separator-Verbunds für Lithium-Ionen Batteriezellen*, Schriftreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig, Vulkan Verlag, Essen. ISBN: 978-3-8027-8343-2.

(Schmitt & Raatz 2014)

Schmitt, J. & Raatz, A. (2014), „Failure Mode Based Design and Optimization of

the Electrode Packaging Process for Large Scale Battery Cells“, *Advanced Materials Research, WGP Congress 2012*, Berlin, Deutschland, (Vol 907 (2014)), S. 309–319. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.907.309> [13.01.2020].

(Schmitt & Raatz et al. 2014)

Schmitt, J.; Raatz, A.; Dietrich, F.; Dröder, K. & Hesselbach, J. (2014), „Process and performance optimization by selective assembly of battery electrodes“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63 (1), S. 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.018> [08.01.2020].

(Schröder & Aydemir et al. 2016)

Schröder, R.; Aydemir, M.; Glodde, A. & Seliger, G. (2016), „Design and Verification of an Innovative Handling System for Electrodes in Manufacturing Lithium-ion Battery Cells“, *Procedia CIRP*, 50 , S. 641–646. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.198> [02.12.2019].

(Schröder & Glodde et al. 2015)

Schröder, R.; Glodde, A.; Aydemir, M. & Bach, G. (2015), „Process to Increase the Output of Z-Folded Separators for the Manufacturing of Lithium-Ion Batteries“, *Applied Mechanics and Materials, Progress in Production Engineering*, 794 , S. 19–26. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.794.19> [10.11.2019].

(Singh & Kaiser et al. 2015)

Singh, M.; Kaiser, J. & Hahn, H. (2015), „Thick Electrodes for High Energy Lithium Ion Batteries“, *Journal of the Electrochemical Society*, 162 (7), S. A1196-A1201. doi: 10.1149/2.0401507jes [14.12.2019].

(Spieler & Helbig 2011)

Spieler, M. & Helbig, F. (2011), „Automatisiertes Handling für biegeschlaffe Strukturen zur Herstellung thermoplastischer FKV-Bauteile. Herstellungstechnologien zur partiellen Faserhalbzeugverstärkung von thermoplastischen Spritzgussbauteilen - PAFATHERM-Technologie“, *Abschlussseminar 2011, Technische Universität Chemnitz* . [https://www.leichtbau.tu-chemnitz.de/get\\_valuefile.php?id=82](https://www.leichtbau.tu-chemnitz.de/get_valuefile.php?id=82) [15.12.2019].

(Stühm & Tornow et al. 2014)

Stühm, K.; Tornow, A.; Schmitt, J.; Grunau, L.; Dietrich, F. & Dröder, K. (2014), „A novel gripper for battery electrodes based on the Bernoulli-principle with integrated

exhaust air compensation“, *Procedia CIRP* (23), S. 161–164.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.065> [10.01.2020].

(Tagawa & Brodd 2009)

Tagawa, K. & Brodd, R. J. (2009), „Production processes for fabrication of lithium-ion batteries“. Lithium-ion batteries - science and technologies in *Lithium-Ion Batteries*, Hrsg. M. Yoshio, R. J. Brodd & A. Kozawa, Springer, New York, S. 181–194. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-34445-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-34445-4_8) [10.11.2019].

(Takamura & Brodd 2006)

Takamura, T. & Brodd, R. J. (2006), „Carbonaceous Materials for Batteries“ in *New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems: Batteries, Supercapacitors and Fuel Cells. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*, Hrsg. I. V. Barsukov, C. S. Johnson, J. E. Doninger & V. Z. Barsukov, Springer, Dordrecht, S. 157–169. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4812-2\\_12](https://doi.org/10.1007/1-4020-4812-2_12) [04.12.2019].

(Techel 2011)

Techel, A. (Hrsg.) (2011), *DeLIZ Produktionstechnisches Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen. Ergebnisbericht zum Verbundvorhaben Entwicklung neuer automatisierter Produktionsverfahren zur wirtschaftlichen Massenfertigung von hochenergetischen Lithium-Ionen-Zellen*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart.

(Tornow & Graubohm et al. 2016)

Tornow, A.; Graubohm, R.; Dietrich, F. & Dröder, K. (2016), „Design Automation for Battery System Variants of Electric Vehicles with Integrated Product and Process Evaluation“, *Procedia CIRP*, 50 , S. 424–429.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.025> [01.08.2019].

(VDI 2860:1990-05)

VDI 2860:1990-05 (1990), *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, Beuth-Verlag, Berlin.

(Vetter & Novak et al. 2005)

Vetter, J.; Novak, P.; Wagner, M. R.; Veit, C.; Möller, K. C.; Besenhard, J.O.; Winter, M.; Wohlfahrt-Meherens, M.; Vogler, C. & Hammouche, A. (2005), „Aging mechanisms in lithium-ion batteries“, *Journal of Power Sources*, 147 , S. 269–281.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006> [10.12.2019].

(Vuorilehto 2013)

Vuorilehto, K. (2013), „Materialien und Funktionen“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, S. 21–30.

(Wagner 2015)

Wagner, H. (2015), *Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen*. Dissertation, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), SHAKER Verlag, Düren. ISBN: 978-3-8440-4603-8.

(Weicker 2015)

Weicker, K. (2015), *Evolutionäre Algorithmen*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-09958-9.

(Weidauer 2013)

Weidauer, J. (2013), *Elektrische Antriebstechnik. Grundlagen, Auslegung, Anwendungen, Lösungen*, Publicis Publishing, Erlangen. ISBN: 9783895784316.

(Westermeier & Reinhart et al. 2013)

Westermeier, M.; Reinhart, G. & Zeilinger, T. (2013), „Method for Quality Parameter Identification and Classification in Battery Cell Production quality planning of complex production chains for battery cells“, *2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nürnberg*, S. 1–10.  
10.1109/EDPC.2013.6689742 [20.01.2020].

(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> [15.12.2019].

(Zheng & Tan et al. 2012)

Zheng, H.; Tan, L.; Liu, G.; Song, X. & Battaglia, V. S. (2012), „Calendering effects on the physical and electrochemical properties of Li[Ni<sub>1</sub>/3Mn<sub>1</sub>/3Co<sub>1</sub>/3]O<sub>2</sub> cathode“, *Journal of Power Sources*, 208, S. 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.001>.

(Zimmer 2008)

Zimmer, R. (2008), *Fertigungstechniken Druckweiterverarbeitung. Falzen*, Bundesverband Druck und Medien (bvdm), Berlin. [https://mediencommunity.de/system/files/DWV05-2\\_Vers01-03\\_0408.pdf](https://mediencommunity.de/system/files/DWV05-2_Vers01-03_0408.pdf) [10.01.2020].

(Zitt 2001)

Zitt, H. (2001), „Entwicklung einer Modell-Bibliothek zur Simulation von Bahnspannung und Tänzerbewegung beim Transport von Materialbahnen“. Dissertation, Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II der Universität des Saarlandes .



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

Bisher erschienene Bände:

---

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

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

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

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

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

**Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen**

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

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

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

**Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich**

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

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

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

**Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen**

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

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

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

**Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen**

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

**Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung**

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

**Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung**

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

**Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern**

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

**Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente**

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

**Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen**

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

**Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme**

Band 16  
Dr.-Ing. Martin Ochs

**Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung**

Band 17  
Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

**Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik**

Band 18  
Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

**Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen**

Band 19  
Dr.-Ing. Rudolf Wieser

**Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen**

Band 20  
Dr.-Ing. Edgar Schmitt

**Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur**

Band 21  
Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

**Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen**

Band 22  
Dr.-Ing. Dieter Buchberger

**Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen**

Band 23  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

**Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen**

Band 24  
Dr.-Ing. Lukas Loeffler

**Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen**

Band 25  
Dr.-Ing. Thomas Friedmann

**Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren**

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

**Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung**

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

**Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem**

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

**Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder**

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

**Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen**

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

**Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen**

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

**Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben**

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

**Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen**

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

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

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

**Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik**

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

**Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen**

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

**Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion**

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

**Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen**

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

**Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen**

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

**Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen**

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

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

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

**Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen**

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

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

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

**Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen**

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

**Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes**

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

**Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen**

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

**Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung**

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

**Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen**

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

**Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen**

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

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

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

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

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

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

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

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

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

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

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

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

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

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

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

**Inprocess-Geometriemessung beim Honen**

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

**Objektorientierte Projektierung von SPS-Software**

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

**Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten**

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

**Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit**

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

**Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

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

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

**Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung**

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

**Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen**

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

**Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem**

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

**Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse**

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

**Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation**

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

**Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung**

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

**Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse**

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

**Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen**

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

**Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges**

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

**Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten**

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

**Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen**

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

**Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie**

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

**Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit**

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

**Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien**

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

**Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner**

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

**Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung**

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

**Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung**

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

**Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)**

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

**Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen**

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

**Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen**

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

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

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

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

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

**Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen**

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

**Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse**

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

**Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality**

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

**Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung**

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

**Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion**

Band 90  
Dr.-Ing. Dirk Vossman

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91  
Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung**

Band 92  
Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung**

Band 93  
Dr.-Ing. Jürgen Brath

**Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien**

Band 94  
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

**Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung**

Band 95  
Dr.-Ing. Marco Lanza

**Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design**

Band 96  
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

**Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 97  
Dr.-Ing. Frank Reinboth

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

Band 98  
Dr.-Ing. Lutz Trender

**Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung**

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

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

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

**Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen**

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

**Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung**

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

**Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs**

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

**Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten**

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

**Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau**

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

**Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb**

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

**Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten**

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

**Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen**

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

**Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement**

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser  
Abrasive Strahl schneiden**

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 Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

**Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode**

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

**Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse**

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

**Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method**

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

**Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme**

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

**Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung**

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

**Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung**

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

**Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation**

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

**Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen**

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

**Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen**

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

**Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen**

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

**Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel**

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

**Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile**

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

**Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten**

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

**Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen**

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

---

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

**Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen**

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

**Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities**

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

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

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

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

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

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

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

**Risikomanagement von Garantieleistungen**

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

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

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

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

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit**

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

**Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling**

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

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

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

**Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

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

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

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

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

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

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

**Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen**

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden  
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

**Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben**

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

**Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen**

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

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

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau  
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der  
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration  
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

**Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung**

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

**Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung**

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

**Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen**

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

**Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern**

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

**Mikroverzahnungsnormal**

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

**Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen**

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

**Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten**

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

**Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren**

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

**Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge**

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

**Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten**

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

**Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen**

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

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

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

**Servicefähigkeit**

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

**Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes**

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion**

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

**Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen**

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

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

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

**Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für  $\mu$ MIM-Bauteile**

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

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

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

**Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

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

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

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

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

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

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebsselementen**

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

**Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken**

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

**Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4**

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

**Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge**

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

**Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen**

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

**Robustheit verketteter Produktionssysteme**

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

**Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen**

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

**Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen**

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

**Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation**

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

**Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren**  
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

**Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse**

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

**Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion**

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

**Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen**

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

**Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette  
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels  
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-  
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken**

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit  
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-  
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch  
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-  
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

**Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound**

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

**Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

**Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung**

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

**Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme**

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

**Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4**

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

**Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen**

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren**

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

**Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung**

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

**Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile**

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

**Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem**

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

**Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz**  
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

**Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**  
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

**Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen**

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

**Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion**

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

**Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen**



