

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

Hannes Wilhelm Weinmann

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

Band 259



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

Hannes Wilhelm Weinmann

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

Band 259

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

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

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

angenommene

Dissertation

von

Hannes Wilhelm Weinmann

Tag der mündlichen Prüfung: 18.08.2022
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Franz Dietrich

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8785-7

ISSN 0724-4967

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

Vorwort des Herausgebers

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

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

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

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 in diesem Zusammenhang Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner Arbeit als Hauptreferent, die Förderung meiner Person, die vielen offenen und konstruktiven Diskussionen und das mir stets entgegengebrachte Vertrauen. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Dietrich für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Frank Henning danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Einen besonderen Dank möchte ich darüber hinaus Herrn Dr. Werner Bauer, Dr. Marcus Müller, Dr. Anna Smith sowie Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Wilhelm Schabel für die Möglichkeit zur Mitbenutzung der Labore aussprechen.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen möchte ich mich für die kollegiale Zusammenarbeit, die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre sowie die vielen gemeinsamen Erinnerungen während meiner Zeit am Institut bedanken. Darüber hinaus danke ich den Sekretariaten und Service-Centern für deren Unterstützung. Gleiches gilt für die vielen Studentinnen und Studenten die mich als wissenschaftliche Hilfskräfte oder im Rahmen von Abschlussarbeiten unterstützt und damit auch zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben. Ein besonderer Dank gilt dabei Nils Schmidgruber und Hannes Glück, die mich über viele Jahre begleitet haben.

Meinen Eltern danke ich für die Förderung und allgegenwärtige Unterstützung bei der Verfolgung meiner Ziele sowie in der Bestärkung meiner Entscheidungen. Diese haben mir das Studium und die Erstellung dieser Arbeit überhaupt erst ermöglicht.

Mein abschließender und tiefster Dank gilt meiner Lebenspartnerin Julia, die mich in meinen Vorhaben stets unterstützt und bestärkt hat. Insbesondere die schriftliche Ausarbeitung erfolgte fernab der regulären Arbeitszeit und nur durch ihren Rückhalt war es möglich, diese schwierige Aufgabe zu meistern.

Rheinstetten, im September 2022

Hannes W. Weinmann

Abstract

One of the greatest challenges in the planning of new battery plants is the early commitment to a specific cell format. This is due to the rigidity of current manufacturing equipment and the immense setup effort and downtimes involved in format changes. Consequently, a new and flexible machine concept is required, which differs from the current standard production equipment.

In order to resolve the existing deficit, the state of the art of process and equipment technology is analyzed in detail and the current deficits in the area of separation and stack formation are worked out. In addition, a detailed functional, motion and accuracy analysis of separation and stack formation machines is carried out as well as experimental interdependency studies along the separation and stacking process.

Within the scope of this work, a concept for flexible and continuous single-sheet stacking is developed which integrates the process steps of separating and stacking and thus greatly reduces complexity. The concept was implemented in a prototype setup and is capable of separating individual electrode sheets of variable length and positioning them precisely on the stacking table without excessive setup efforts and downtimes.

The new concept offers cell manufacturers greater flexibility in adapting cell formats according to market demands and provides the conventional machine construction industry a perspective of participating in an existing market environment. The new concept has shown very high precision in terms of electrode sheet dimensional accuracy, positioning accuracy and cut quality and is in the upper range of commercial suppliers.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abkürzungen | IV |
| Formelverzeichnis | VI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit | 2 |
| 2 Stand der Technik und Forschung | 3 |
| 2.1 Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen Batteriezelle | 3 |
| 2.2 Elementare Bestandteile einer Batteriezelle | 5 |
| 2.2.1 Separatoren | 5 |
| 2.2.2 Elektroden | 6 |
| 2.2.3 Optimierungsansätze Materialien | 8 |
| 2.3 Zellbauformen, Verbundbauweisen und Formate | 9 |
| 2.3.1 Zellbauformen | 9 |
| 2.3.2 Verbundbauweisen von Zellstapeln | 11 |
| 2.3.3 Optimierungsansätze Batteriezelle | 13 |
| 2.3.4 Marktübersicht Zellformate | 17 |
| 2.4 Industrieller Zellherstellungsprozess | 18 |
| 2.4.1 Gesamtprozesskette | 19 |
| 2.4.2 Vorstellung ausgewählter Einzelprozessschritte | 22 |
| 2.4.3 Linienplanung und Einzelanlagenverkettung | 34 |
| 2.5 Industrielle Vereinzelungs- und Stapelmaschinen | 35 |
| 2.5.1 Vereinzelungsmaschinen | 35 |
| 2.5.2 Stapelmaschinen | 43 |
| 2.6 Bearbeitungsspektren der Maschinen | 54 |
| 2.7 Zusammenfassung und Ableitung des Forschungsdefizites | 56 |
| 2.7.1 Zusammenfassung des Stand der Technik und Forschung | 56 |
| 2.7.2 Ableitung des Forschungsdefizites | 58 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3 | Zielstellung und Vorgehensweise | 59 |
| 3.1 | Zielstellung | 59 |
| 3.2 | Vorgehensweise | 59 |
| 4 | Analyse der Wirkzusammenhänge | 62 |
| 4.1 | Analyse der Teilprobleme | 62 |
| 4.1.1 | Funktionsanalyse | 62 |
| 4.1.2 | Genauigkeits- und Bewegungsanalyse | 64 |
| 4.1.3 | Flexibilitätsanalyse | 72 |
| 4.2 | Analyse der Einzelprobleme | 79 |
| 4.2.1 | Materialführung | 79 |
| 4.2.2 | Vereinzelung | 95 |
| 4.2.3 | Handhabung | 102 |
| 4.2.4 | Ausrichtung | 110 |
| 4.2.5 | Fügen und Fixierung | 112 |
| 4.3 | Ableitung von Prämissen zur Auslegung des Anlagenmoduls | 116 |
| 4.3.1 | Kontinuität und Produktivität | 117 |
| 4.3.2 | Flexibilität | 119 |
| 4.3.3 | Qualität | 120 |
| 4.4 | Herleitung eines Grobkonzeptes für ein flexibles Verfahren | 123 |
| 5 | Auslegung des Anlagenmoduls | 127 |
| 5.1 | Erarbeitung von Einzellösungen | 127 |
| 5.1.1 | Materialspeicher und Tänzer | 127 |
| 5.1.2 | Drehrahmen | 133 |
| 5.1.3 | Handhabungselement | 136 |
| 5.1.4 | Stapelstation | 146 |
| 5.2 | Erarbeitung von Teillösungen | 148 |
| 5.2.1 | Kontinuierliches und funktionsintegriertes Handhabungssystem | 148 |
| 5.2.2 | Flexibles Handhabungssystem | 157 |
| 5.3 | Erarbeitung der Gesamtlösung | 160 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3.1 | Gesamtaufbau (Coil2Stack-Modul) | 161 |
| 5.3.2 | Verfahrensablauf | 162 |
| 5.4 | Realisierung | 167 |
| 6 | Optimierung der Anlagenparameter | 169 |
| 6.1 | Identifikation qualitätskritischer Einflüsse | 169 |
| 6.2 | Untersuchung der Wechselwirkungen im Aufbau | 170 |
| 6.2.1 | Elastische Dehnung der Materialbahn | 171 |
| 6.2.2 | Materialverhalten in der freien Bahnlänge | 172 |
| 6.2.3 | Nachgiebigkeit der runden Grundplatte | 175 |
| 6.2.4 | Nachgiebigkeit des Gesamtaufbaus | 175 |
| 6.3 | Ableitung von Prozesskennfeldern | 177 |
| 7 | Validierung und Bewertung | 180 |
| 7.1 | Genauigkeitsmessungen | 180 |
| 7.1.1 | Handhabungselement (SLM-Druck) | 181 |
| 7.1.2 | Handhabungssystem | 181 |
| 7.1.3 | Elektrodeneinzelblätter | 182 |
| 7.2 | Bewertung der Genauigkeiten | 188 |
| 7.2.1 | Vergleich mit kommerziellen Vereinzelungsmaschinen | 188 |
| 7.2.2 | Vergleich mit kommerziellen Stapelmaschinen | 188 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 189 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 189 |
| 8.2 | Ausblick | 191 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 192 |
| | Abbildungsverzeichnis | I |
| | Tabellenverzeichnis | X |
| | Anhang | XII |

Abkürzungen

| Abkürzung | Bezeichnung |
|------------------------|---|
| A | Anode |
| AGVs | Automated Guided Vehicles |
| Ah | Amperestunde |
| Al-Folien | Aluminiumfolien |
| ANSI | American National Standards Institute |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CCD | Charge-Coupled Device |
| CMC | Carboxymethyl Cellulose |
| Cu-Folien | Kupferfolien |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| EDX | Energy Dispersive X-ray Spectroscopy |
| g | Gramm |
| GWh | Gigawattstunde |
| HF | Hauptfunktion |
| K | Kathode |
| KGT | Kugelgewindetrieb |
| LFP | Lithiumeisenphosphat |
| LiNiMnCoO ₂ | Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide |
| l | Liter |
| m | Meter |
| M | Mittelwert |
| mbar | Millibar |
| MD | Machine Direction (Verarbeitungsrichtung) |
| min | Minute |
| mm | Millimeter |

| | |
|----------------------|---------------------------------------|
| MPa | Megapascal |
| NCA | Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide |
| NF | Nebenfunktion |
| NiMnCoO ₂ | Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide |
| NMC | Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide |
| NMP | N-Methyl-2-Pyrrolidon |
| OPG | Offset-Pivot Guide |
| PE | Polyethylen |
| PHEV | Plug-in Hybrid Electric Vehicle |
| PP | Polypropylen |
| ppm | parts per minute |
| PPS | parts per second |
| PVdF | Poly Vinylidene Difluoride |
| RPG | Remotely-Pivot Guide |
| S | Separator |
| SD | Standardabweichung |
| SLM | Selective Laser Melting |
| t | Tonnen |
| VDI | Verband Deutscher Ingenieure |
| VGCF | Vapor Grown Carbon Fibers |
| Wh/l | Volumetrische Energiedichte |
| ZP | Zeitpunkt |
| µm | Mikrometer |

Formelverzeichnis

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|------------------|---|-------------------|
| A_{eff} | effektive Saugfläche | mm ² |
| A | Greiffläche | mm ² |
| a | Schneidspalt | mm |
| B | Biegesteifigkeit | mNcm ² |
| b | Breite der Materialbahn | mm |
| $b_{maxAusM}$ | maximale Elektrodenblattbreite beim mech. Ausrichten | mm |
| b_{maxV} | maximale Elektrodenblattbreite beim Vereinzeln | mm |
| b_{maxG} | maximale Elektrodenblattbreite beim Greifen | mm |
| b_{maxMZ} | maximale Elektrodenblattbreite beim Magazinieren | mm |
| $b_{maxVarM}$ | maximale Verstellmöglichkeit beim Ausrichten für die Elektrodenblattbreite | mm |
| $b_{minAusM}$ | minimale Elektrodenblattbreite beim mech. Ausrichten | mm |
| b_{minG} | minimale Elektrodenblattbreite beim Greifen | mm |
| b_{minK} | minimale Elektrodenblattbreite die zur Klemmung des Elektrodenblattes notwendig ist | mm |
| b_{minV} | minimale Elektrodenblattbreite beim Vereinzeln | mm |
| b_{varMZ} | Verstellmöglichkeit über das Langloch des Magazins für die Elektrodenblattbreite | mm |
| d | Durchbiegung einer Achse aus Vollmaterial | mm |
| d_{Folie} | Dicke der Kupferfolie | mm |
| Δl_d | Längendifferenz durch Durchhang der Materialbahn | mm |
| $\Delta l_{el.}$ | Längenänderung durch elastische Dehnung | mm |
| Δl_H | Bewegung des Handhabungselementes durch wirkende Bahnzugkraft | mm |
| Δp | Differenzdruck | N/m ² |
| Δp_0 | erhöhten Differenzdruck bei Überhanglängen | N/m ² |
| Δp_1 | End-Differenzdruck | N/m ² |
| ΔV | Voreilung | % |

| | | |
|-----------------------|---|------------------|
| E | Elastizitätsmodul | MPa |
| F_1 | Längengewichtskraft | mN/cm |
| F_{An} | Anlagekraft | N |
| F_B | Bahnzugkraft | N |
| F_E | Ersatzkraft am Ende der Achse | N |
| F_N | Normalkraft | N |
| F_T | Tangentialkraft | N |
| g^n | Fallbeschleunigung | m/s ² |
| h_i | Hebel des Achsabschnittes i | mm |
| h | Durchhang der Materialbahn | mm |
| J_{d_i} | Flächenträgheitsmoment in Abhängigkeit des Achsdurchmessers d_i | mm ⁴ |
| l | Probenkörperlänge | mm |
| l_0 | vorgegebene Elektrodenblattlänge | mm |
| l_G | Länge der Greiferfläche | mm |
| l_K | Länge der Kettenlinie | mm |
| $l_{\max\text{AusM}}$ | maximale Elektrodenblattlänge beim mechanischen Ausrichten | mm |
| $l_{\max\text{V}}$ | maximale Elektrodenblattlänge beim Vereinzeln | mm |
| $l_{\max\text{G}}$ | maximale Elektrodenblattlänge beim Greifen | mm |
| $l_{\max\text{MZ}}$ | maximale Elektrodenblattlänge beim Magazinieren | mm |
| $l_{\max\text{VarM}}$ | maximale Verstellmöglichkeit beim Ausrichten für die Elektrodenblattlänge | mm |
| $l_{\min\text{AusM}}$ | minimale Elektrodenblattlänge beim mechanischen Ausrichten | mm |
| $l_{\min\text{G}}$ | minimale Elektrodenblattlänge die beim Greifen | mm |
| $l_{\min\text{V}}$ | minimale Elektrodenblattlänge beim Vereinzeln | mm |
| $l_{\bar{u}}$ | Überhanglänge | mm |
| l_{varMZ} | Verstellmöglichkeit über das Langloch des Magazins für die Elektrodenblattlänge | mm |
| m | Probekörpermasse | kg |

| | | |
|-------------------|---|-------------------|
| m_A | Flächengewicht | kg/m ² |
| m_{HF} | Gewicht der Probe in Hilfsflüssigkeit | g |
| m_L | Gewicht der Probe in Luft | g |
| ρ_{HF} | Dichte der Hilfsflüssigkeit | g/cm ³ |
| φ | Eingriffswinkel | ° |
| ρ_L | Dichte der Luft | g/cm ³ |
| ρ_P | Probendichte | g/cm ³ |
| ppmHauptachse | Takt der Hauptachse | |
| ppmStapelstation | Takt der Stapelstation | |
| S | Sicherheitszuschlag | |
| SFlächengreifer | Wegstrecke die Flächengreifer zwischen Ausrichtstation und Stapelstation zurücklegt | mm |
| SSauggreifer | Wegstrecke die Sauggreifer zwischen Magazin und Ausrichtstation zurücklegt | mm |
| SStapelvorgang | Wegstrecke die Stapelstation zwischen der Anoden und Kathodenposition zurücklegt | mm |
| SsyncBahnAB | Wegstrecke zur Verzögerung von Bahngeschwindigkeit zum Stillstand | mm |
| SsyncBahnAUF | Wegstrecke zum Aufsynchronisieren auf die Materialbahn | mm |
| SsyncBahn | Wegstrecke in der sich Bahn und Werkzeug in Synchronisation befinden | mm |
| SsyncBand | Wegstrecke in der sich Band und Werkzeug in Synchronisation befinden | mm |
| SsyncBandAB | Wegstrecke zur Verzögerung von Bandgeschwindigkeit zum Stillstand | mm |
| SsyncBandAUF | Wegstrecke zum Aufsynchronisieren auf das Band | mm |
| t_1 | Dauer der Evakuierung | s |
| t_{async} | asynchrone Zeit | s |
| $t_{Rück}$ | Zeit für Rückstellbewegung | s |
| t_{sync} | synchrone Zeit | s |
| SsyncBahnAB | Zeit zur Verzögerung von Bahngeschwindigkeit zum Stillstand | s |
| $t_{syncBahnAUF}$ | Zeit zum Aufsynchronisieren auf die Bahngeschwindigkeit | s |

| | | |
|--------------------------|---|-------------------|
| $s_{\text{syncBandAB}}$ | Zeit zur Verzögerung von Bandgeschwindigkeit zum Stillstand | s |
| $t_{\text{syncBandAUF}}$ | Zeit zum Aufsynchronisieren auf Bandgeschwindigkeit | s |
| U | Überdeckung | mm |
| u_K | Umfang des Kreismessers | mm |
| u_N | Umfang des Niederhalters | mm |
| \dot{V} | Volumenstrom | m ³ /s |
| V_G | zu evakuierendes Greifervolumen | m ³ |
| v_K | Voreilung des Kreismessers | % |
| \dot{V}_p | Volumen zwischen Ejektor und Greifer | m ³ |
| w | Abstand zwischen den Handhabungselementen | mm |
| ψ | Schränkungswinkel | ° |
| μ | Reibwert | |

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die weltweit rasant steigende Nachfrage nach elektrischen Energiespeichern veranlasst Zellhersteller zur massiven Ausweitung deren Produktionskapazitäten. Die in Europa angekündigten Kapazitäten werden bis zum Jahr 2030 von derzeit rund 10 GWh auf über 600 GWh pro Jahr ausgeweitet (Thielmann & Wietschel et al. 2020, S. 13), wobei etwa die Hälfte davon (~280 GWh) in Deutschland installiert werden sollen (Hettesheimer & Wietschel 2021, S. 5). Dies bedarf der Planung, dem Bau und der anlagenseitigen Ausstattung von bis zu 22 neuen Werken – allein neun davon in Deutschland¹.

Eine in diesem Kontext grundsätzliche Herausforderung für die Zellhersteller und deren Kunden besteht darin, sich bei der Planung neuer Werke frühzeitig auf ein spezifisches Zelldesign und dafür geeignetes Produktionsequipment festlegen zu müssen (Michaelis & Rahimzei et al. 2018, S. 19). Ist die Planung abgeschlossen, lässt die Serienfertigung i.d.R. keine nennenswerte Variabilität mehr zu (Michaelis & Rahimzei et al. 2018, S. 68–69). Dies liegt vordergründig in der Rigidität der Anlagentechnik sowie der Optimierung der Maschinenkapazitäten (Anlagenanzahl) auf einen vom Zelldesign optimalen Betriebspunkt begründet (Fleischer & Weinmann et al. 2021, S. 10–13).

Der Vereinzelung und Stapelbildung kommt in diesem Kontext eine besondere Bedeutung zu, da hier die Anzahl an Einzelkomponenten und damit die notwendige Zahl an Anlagen stark ansteigt (Hettesheimer & Thielmann 2018, S. 28–29; Fleischer & Weinmann et al. 2021, S. 7). Änderungen am Zelldesign (Format oder Material), verursachen immense Anpassungsaufwände an diversen formatspezifischen Vorrichtungen, Werkzeugen und Endeffektoren. Erschwerend findet im Prozessschritt Vereinzeln eine Transition von einer kontinuierlichen (Elektrodenbahn) zu einer diskontinuierlichen (Elektrodeneinzelblatt) Prozessführung statt, weshalb sich Änderungen am Format hier besonders auf den Output und den resultierenden Engpass in der Produktionslinie auswirken (Fleischer & Weinmann et al. 2021, S. 10–13).

Es bedarf folglich eines neuartigen und insbesondere flexiblen Anlagenkonzeptes, welches sich von dem Standardproduktionsequipment etablierter Hersteller differenziert (Hettesheimer & Thielmann et al. 2017, S. 28). Dies soll den Zellherstellern und deren

¹ Batterieprojekte in Europa (Stand Juni 2021), <https://battery-news.de/index.php/2021/06/25/batterieprojekte-in-europa-juni-2021> [abgerufen am 32.11.2021]

Kunden zum einen mehr Flexibilität und Planungssicherheit verschaffen und zum anderen einen potenziellen Markt für den konventionellen Sondermaschinenbau eröffnen, um sich mit eigener hochflexibler Anlagentechnik in einem bereits bestehenden Wettbewerbsumfeld behaupten zu können (Fleischer & Weinmann et al. 2021, S. 22).

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Basierend auf der eingangs beschriebenen Marktsituation und Problemstellung, soll im Rahmen dieser Dissertation ein flexibles und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul entwickelt werden, welches die Prozessschritte Vereinzeln und Stapeln integriert. Dieses leitet sich aus Prämissen ab, welche auf Basis des Stand der Technik, Vorversuchen sowie technologiespezifischen Recherchen formuliert werden.

Dazu wird in **Kapitel 2** zunächst detailliert auf den Stand der Technik und Forschung aus Sicht der Prozess- und Anlagentechnik eingegangen und das gegenwärtige Defizit im Bereich der Vereinzelnung und Stapelbildung herausgearbeitet.

Im Rahmen von **Kapitel 3** erfolgen eine Konkretisierung der Zielstellung sowie eine Beschreibung der methodischen Vorgehensweise zur Zielerreichung.

In **Kapitel 4** werden über eine Funktions-, Bewegungs- und Genauigkeitsanalyse sowie umfassende Wirkzusammenhangsuntersuchungen Prämissen abgeleitet. Diese münden unter Einbezug relevanter Vorarbeiten im Bereich der flexiblen Handhabung und kontinuierlichen Prozessführung in der Herleitung eines Grobkonzepts.

Die detaillierte Ausarbeitung der Lösung findet im darauffolgenden **Kapitel 5** statt. Hier erfolgt die Auslegung zentraler Komponenten auf Basis abgeleiteter Prämissen, ergänzender Recherchen und komponentenspezifischer Vorversuche. Des Weiteren erfolgt eine Integration der erarbeiteten Lösungen in das Gesamtmodul.

In **Kapitel 6** erfolgen experimentelle Untersuchungen und die analytische Herleitung von Prozessfenstern im reellen Aufbau. Diese dienen der Ableitung initialer Produktionsparameter für die abschließende Validierung des neuen Anlagenkonzepts.

In **Kapitel 7** wird die Funktionsfähigkeit des Moduls in Bezug auf die erreichbaren Maß- und Positioniergenauigkeiten untersucht und mit kommerziellen Anlagen verglichen.

Kapitel 8 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche Forschungsfragen im Bereich der Vereinzelnung und Stapelbildung.

2 Stand der Technik und Forschung

Die Batterie ist ein äußerst komplexes Produkt und es bedarf der Integration diverser Fachdisziplinen aus Chemie, Elektrotechnik, Thermodynamik, Prozess- und Anlagentechnik etc., um diese verstehen und ganzheitlich optimieren zu können. Aufgrund der Komplexität der Thematik und mit Blick auf den beschränkten Umfang fokussiert sich diese Arbeit auf relevante Aspekte aus Sicht der Prozess- und Anlagentechnik.

Da die Produkt- und Prozessentwicklung in der Vergangenheit insbesondere durch die Industrie getrieben wurde und nicht öffentlich zugänglich ist, setzt der Stand der Technik ergänzend auf **eigenen Recherchen** auf. Die **Inhalte stammen aus der Dokumentation asiatischer Fachmessen** sowie der Auswertung (anonymisiert) von **Herstellerkatalogen und -daten**.

2.1 Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen Batteriezelle

Eine wiederaufladbare Batteriezelle (Akkumulator) besteht in ihrer kleinsten Einheit, der sogenannten galvanischen Zelle, aus zwei **Elektroden** – Anode und Kathode –, welche über einen elektronisch isolierenden **Separator** räumlich voneinander getrennt sind, vgl. Abbildung 2-1. Die Elektroden wiederum bestehen aus einem Aktivmaterial sowie einem elektrisch leitenden Kollektor (Stromsammler). Beim Ablauf der Redoxreaktionen an den Elektroden (hier für den Entladevorgang) bewegen sich frei werdende Elektronen über einen externen Stromkreis von der Anode zur der Kathode, wobei für die Erhaltung der Ladungsneutralität eine äquivalente Menge Ionen ausgetauscht werden muss. Dieser Austausch erfolgt über den **Elektrolyten** und durch die für Ionen permeable Membran des Separators. (Ketterer & Karl et al. 2009, S. 3)

Die **Funktionsweise** der Batteriezelle beruht auf der Umwandlung von chemischer in elektrische Energie (Entladen) bzw. elektrischer in chemische Energie (Laden). Die eingangs erwähnten Redoxreaktionen beschreiben dabei den Vorgang der Interkalation bzw. Deinterkalation von Lithium-Ionen in die Wirtsstrukturen der Aktivmaterialien. Für einen Entladevorgang gesprochen bedeutet dies, dass die Li-Ionen aus der Wirtsstruktur des Anodenaktivmaterials deinterkalieren und sich über den Elektrolyten in Richtung der Kathode begeben, wo sie in das Kathodenaktivmaterial interkalieren. Aufgrund der beschriebenen Ladungsneutralität fließen über den äußeren Leiterkreis Elektroden zur Kathode, vgl. Abbildung 2-1. (Ketterer & Karl et al. 2009, S. 4)

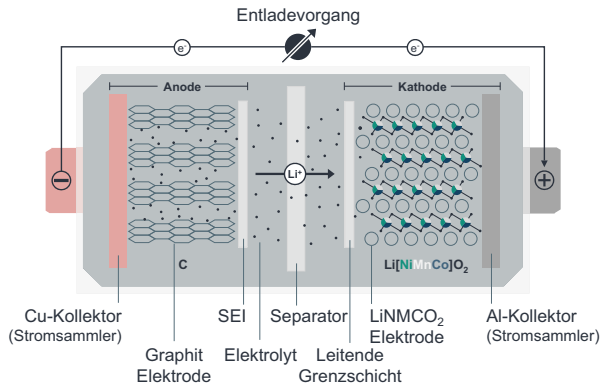


Abbildung 2-1: Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen Zelle (in Anlehnung an (Goodenough & Aruna et al. 2007, S. 11; Leuthner 2013, S. 15))

Die Wirtsstrukturen auf der Anoden- und Kathodenseite, Definition gemäß Abbildung 2-1, können über unterschiedliche Aktivmaterialien realisiert werden. Gegenwärtig dominieren Graphit-Anoden sowie NMC-, LFP- und NCA-Kathoden mit einem Marktanteil größer 90% den Weltmarkt bei Li-Ionen Batteriezellen (Ballinger & Stringer et al. 2019, S. 3–5). Welche Materialien eingesetzt werden, hängt maßgeblich von den Anforderungen die der jeweilige Anwendungsfall an die Batteriezelle stellt ab. Die Optimierungsrichtung ist dabei im Allgemeinen multi-dimensional und zielt meist auf eine Verbesserung der Sicherheit, Energiedichte, Leistungsdichte, Lebensdauer sowie auf eine Kostenreduktion ab. Aspekte wie Rohstoffverfügbarkeit, Umweltfreundlichkeit und Rezyklierbarkeit spielen aufgrund der Ausweitung der Produktionskapazitäten zunehmend eine immer bedeutendere Rolle. (Nitta & Wu et al. 2014, S. 252–254; Jiang & Zhang 2015, S. 1–4; Singh & Kaiser et al. 2016, S. 245)

In der Praxis erfolgt eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Aktivmaterialien im Hinblick auf die oben dargestellten Optimierungsrichtungen. Für die weit verbreiteten Li-NiMnCoO₂ (NMC)-Kathoden gibt es einen Trend hin zu nickelreichen Materialien, da diese höhere Energie- und Leistungsdichten ermöglichen (Thielmann & Neef et al. 2017, S. 30–31). Für die Graphit-Anoden spielt u.a. die Zugabe von Silizium bzw. die Steigerung des Si-Anteils im Graphit eine wichtige Rolle (Thielmann & Neef et al. 2017, S. 42–43). Eine Übersicht zu den unterschiedlichen Anoden- und Kathodenaktivmaterialien findet sich beispielsweise in den Reviews von Nitta & Wu et al. (2014), Pradeep & Sivasenthil et al. (2019) und Manthiram (2020).

2.2 Elementare Bestandteile einer Batteriezelle

Die Bestandteile einer Batteriezelle lassen sich grundsätzlich in Aktiv- und Inaktivmaterialien einteilen. Zu den **Aktivmaterialien** zählen das in Kapitel 2.1 exemplarisch erwähnte LiNiMnCoO_2 (Kathode) sowie der Graphit (Anode). Zu den **Inaktivmaterialien** zählen neben den Bindern und Leitrußen auch die Kollektorfolien (Stromsammler), Separatoren und alle Teile des Zellgehäuses (Singh & Kaiser et al. 2016, S. 245). Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Zellstapelbildung liegt, werden die Komponenten des Zellgehäuses fortan von der Betrachtung ausgenommen.

2.2.1 Separatoren

Obwohl der Separator zu den Inaktivmaterialien zählt, kommt ihm eine gewichtige Rolle bei der Stapelbildung und dem späteren Betrieb der Zelle zu, denn er verhindert den Kontakt und somit den internen Kurzschluss zwischen der Anode und der Kathode. Die gebräuchlichste Art von Separatoren stellen poröse Polymermembranen dar, welche aus **Polyethylen (PE)**, **Polypropylen (PP)** oder einer Kombination beider Materialien bestehen (Arora & Zhang 2004, S. 4422). Die polymeren Separatoren können wiederum **ein-** oder **mehrlagig** aufgebaut sein (Deimede & Elmasides 2015, S. 454). Zur Verbesserung der thermischen Stabilität (Schrumpfung) und Sicherheit der Batteriezelle sowie aufgrund des verbesserten Benetzungsverhaltens haben sich dünne (2 bis 5 μm) ein- oder beidseitige **keramische Beschichtungen** auf den Membranen sowie keramische **Vliesstoff-Separatoren** am Markt etabliert (Zhang & Sahraei et al. 2016, S. 693; Blomgren 2017, S. 5021).

Zur Erreichung möglichst hoher Energie- und Leistungsdichten auf Zellebene streben die Separator-Hersteller immer geringere Dicken an, was wiederum die mechanische Stabilität und Sicherheit des Separators negativ beeinflusst. Zhang & Sahraei et al. (2016, S. 693) haben zudem gezeigt, dass Separatoren stark anisotropes Verhalten aufweisen und dass die Versagensspannung und -dehnung von Vliesstoff-Separatoren um den Faktor fünf niedriger ist als bei polymeren Separatoren. Oft wird seitens der Hersteller eine Spezifikation hinsichtlich der Zugfestigkeit angegeben. Aufgrund der herstellungsbedingten Anisotropie ist primär der **Elastizitätsmodul in Maschinenrichtung (MD, machine direction)** entscheidend (Arora & Zhang 2004, S. 4428). Grundsätzlich ist die Zugbeanspruchung in MD gering zu halten, um eine Querkontraktion weitestgehend zu vermeiden (Arora & Zhang 2004, S. 4428; Zhang 2006, S. 352–353).

In Deimede & Elmasides (2015, S. 456) wird zudem von Bahnwölbungen (Camber-Effekten) bei Separatoren in der Zelleassemblierung und in Kurfer & Westermeier et al. (2012a, S. 2) und Simon (2013, S. 250) von ungewollter statischer Aufladung von Materialien in der Trockenraumumgebung der Zellfertigung berichtet.

Die **Dicken** kommerziell verwendeter Separatoren bewegen sich im Bereich zwischen **6 und 25 μm** , abhängig von deren Art und Aufbau (Deimede & Elmasides 2015, S. 454; Schäfer & Weinmann et al. 2020, S. 738).

2.2.2 Elektroden

Elektroden werden in einem Beschichtungs- und Trocknungsprozess hergestellt, in welchem die jeweiligen Beschichtungsmassen (Slurries), bestehend aus unterschiedlichen Aktiv- und Inaktivmaterialien, auf eine Kollektorfolie (Stromsampler) aufgebracht werden. Für eine gute **mechanische Stabilität der Elektrodenstruktur** und eine gute **Hafffestigkeit auf dem Stromsampler** sorgen Binder, welche den Aktivmaterialien im Mischvorgang beigemischt werden (Ketterer & Karl et al. 2009, S. 20). Durch die Zugabe von Leitrußen wird die **Leitfähigkeit** innerhalb der Struktur erhöht (Ceder & Van der Ven et al. 1998, S. 35). Leitfähigkeit und Hafffestigkeit können nicht nur materialseitig, sondern auch prozessseitig (Kalandrieren) weiter erhöht werden (Zheng & Tan et al. 2012, S. 52). Der genaue Herstellungsprozess wird in Kapitel 2.4 im Detail vorgestellt. In Kapitel 2.2.2 soll eine Betrachtung des Elektrodenaufbaus erfolgen.

Bezüglich der **Beschichtungsmasse** werden gegenwärtig Trockenschichtdicken zwischen 50 μm (hohe Leistung) und 150 μm (hohe Energie) realisiert, wobei die gewählte Schichtdicke und Porosität maßgeblich vom Anwendungsfall abhängt (Schmuck & Wagner et al. 2018, S. 274). Mehrheitlich liegen die Elektrodendicken aktuell zwischen **50 und 100 μm** (Bauer 2019, S. 42; Schäfer & Weinmann et al. 2020, S. 738). Hochleistungszellen sind durch geringe Schichtdicken, eine hohe Porosität der Schicht sowie kleine Partikelgrößen bei den Aktivmaterialien gekennzeichnet, um möglichst kurze Diffusionspfade für die Li-Ionen zu ermöglichen (Ketterer & Karl et al. 2009, S. 20). Hochenergiezellen hingegen erlauben höhere Schichtdicken mit geringerer Porosität, allerdings ist eine deutliche Erhöhung des Binderanteils zur Erhaltung der mechanischen Stabilität notwendig (Singh & Kaiser et al. 2015, S. 1196).

Bezüglich der **Kollektorfolien** werden für die Kathoden Aluminiumfolien (Al-Folien) als Trägermaterial verwendet. Die Dicke der Al-Folien wurde in den vergangenen Jahren immer weiter reduziert und beträgt aktuell meist zwischen **10 und 20 μm** (Zhu & Gastol

2021, S. 2). Auf der Anodenseite werden aufgrund der Ausbildung von Lithium-Aluminium-Legierungen bei niedrigem Potential meist Kupferfolien (Cu-Folien) eingesetzt (Vuorilehto 2013, S. 23). Die Dicke der Cu-Folien wurde ebenfalls stetig verringert und liegt aktuell im Bereich zwischen **6 und 15 μm** (Kampker & Hohenthanner 2012, S. 239; Zhu & Gastol 2021, S. 9; Kwade & Haselrieder 2018, S. 291). Die tatsächlich gewählte Foliendicke hängt, wie auch die Beschichtungsdicke, neben den technischen Möglichkeiten der Folienherstellung stark vom Anwendungsfall (Hochenergie oder Hochleistung) ab, da sich ein Zielkonflikt zwischen Energiedichte, elektrischer Leitfähigkeit und thermischer Leitfähigkeit einstellt (Zhu & Gastol 2021, S. 3). Darüber hinaus spielt die Trägerfolie eine wichtige Rolle im Hinblick auf die mechanische Belastbarkeit der Elektrodenbahn.

Abbildung 2-2 zeigt zwei zu Einzelblättern konfektionierte Elektroden. Diese zeichnen sich u.a. durch das Ableiterfähnchen aus, welches Teil der Kollektorfolie ist und über welches die Elektroden nach der Zellstapelbildung kontaktiert werden. Da die Konfektionierung in industriellen Herstellungsprozessen, vgl. Kapitel 2.4, über mehrere Prozessschritte hin erfolgt, entstammen die Schnittkanten i.d.R. nicht demselben Trennverfahren. Die Kombination unterschiedlicher Technologien (Stanze, Laser, Rundmesser, Langmesser, etc.) bedingt folglich auch unterschiedliche Schnittkantenqualitäten an ein und demselben Elektrodenblatt.

In Bezug auf den Elektrodenblattzuschnitt ist das Flächenverhältnis zwischen Kathoden- und Anodenaktivmaterialfläche zu beachten. Die Fläche der Anode ist dabei stets größer auszulegen als die der Kathode, um eine Bildung von Lithium-Dendriten auf der Anodenseite zu vermeiden (Son & Ryou et al. 2013, S. 644).

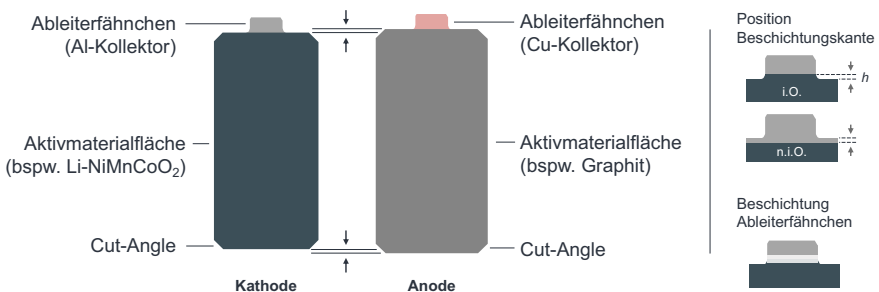


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Kathoden- (links) und Anodenblattes (Mitte) sowie weiterer qualitätsrelevanter Merkmale (rechts)

Da die Kanten und Ecken der Zellgehäuse prozessbedingt minimale Rundungen aufweisen, verfügen die Elektroden aus Großserienprozessen oft über sog. „Cut-Angles“. Diese verhindern ein Stauchen der Elektroden-Eckbereiche im Zellgehäuse (Ōsawa & Yūichirō et al. 2013). Zur Reduktion von Produktionsausschüssen liegt die Beschichtungskante in kommerziellen Herstellungsprozessen meist geringfügig oberhalb der Blattkante (Kim & Kwon 2013). Oftmals verfügen die Elektroden über eine zusätzliche Isolation oder thermoplastische Beschichtung am Ableiterföhnchen (Kovachev & Schröttner et al. 2019, S. 9; Maeda & Shinyashiki et al. 2012). Diese dient der Zellsicherheit, da der positive Ableiter bei Entladung sehr hohe Temperaturen entwickelt (Jung & Kim et al. 2016, S. 1087). Eine etwaige thermoplastische Beschichtung ermöglicht insbesondere auch eine spätere Kapselung der Elektroden, vgl. Kapitel 2.3.3.1.

2.2.3 Optimierungsansätze Materialien

Abbildung 2-3 fasst die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten material- und prozessseitigen Optimierungsansätze nochmals zusammen, beschränkt sich jedoch auf die Anpassungen innerhalb der Aktivmaterialschicht.

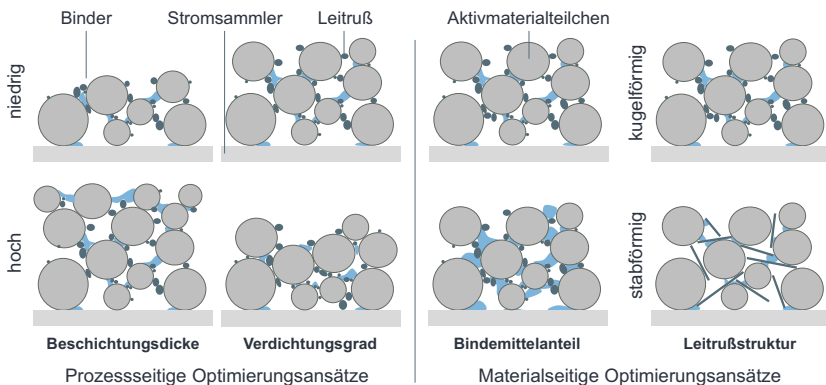


Abbildung 2-3: Materialsystem-unabhängige Optimierungsansätze von Elektroden

Prozessseitige Optimierungsansätze sind u.a. die Erhöhung der Beschichtungsdicke (Singh & Kaiser et al. 2016, S. 245; Pflöging 2017, S. 554) sowie die Verringerung der Porosität über die Erhöhung des Verdichtungsgrades (Zheng & Tan et al. 2012, S. 52) zur Steigerung der volumetrischen Energiedichte. Insbesondere die Erhöhung der Beschichtungsdicke hat dabei einen großen Einfluss auf die Stapelbildung, da sich bei gleicher Kapazität die Anzahl an Elektroden- und Separatorlagen signifikant verringert

(Pfleger 2017, S. 554). Eine Änderung von Beschichtungsdicke und Verdichtungsgrad hat außerdem einen starken Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Schicht.

Materialseitige Optimierungsansätze sind u.a. die Reduktion des Bindemittelanteils in der Beschichtungsmasse zur Erhöhung des Aktivmaterialanteils und folglich der volumetrischen Energiedichte der Zelle (Landesfeind & Eldiven et al. 2018, S. 1123; Pfeleger 2017, S. 554). Weiterhin werden u.a. stabförmige Leiteruß-Strukturen (VGCFs) zur Verbesserung der mechanischen Stabilität sowie der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit der Beschichtung eingesetzt (Endo & Kim et al. 2021, S. 1287).

2.3 Zellbauformen, Verbundbauweisen und Formate

In diesem Kapitel wird auf die verschiedenen Zellbauformen, Verbundbauweisen sowie auf Optimierungsansätze für Batteriezellen eingegangen.

2.3.1 Zellbauformen

Der Begriff Zellbauform bzw. Zelltyp ist im Sinne des physischen Gehäuseaufbaus zu verstehen (Bach 2017, S. 38). Beim Gehäuseaufbau wird zwischen den Kategorien **Hardcase** und **Softpack** unterschieden (Wöhrl 2013, S. 112), wobei die Rund- und Prismatische-Zelle der ersteren und die Pouch-Zelle (auch Folienzelle ugs. Coffee-Bag-Zelle) der letzteren Kategorie zuzuordnen sind, vgl. Abbildung 2-4.

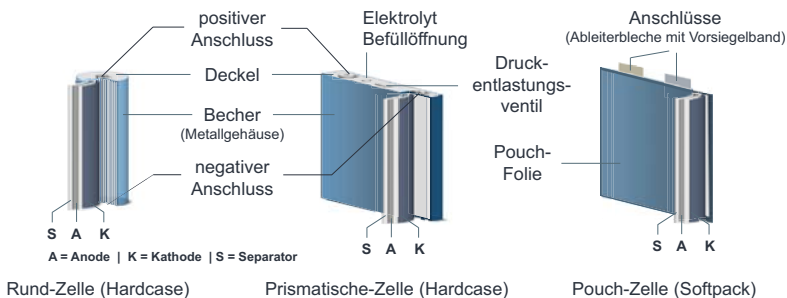


Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung der drei Zellbauformen Rund-Zelle, Prismatische-Zelle und Pouch-Zelle (in Anlehnung an (Johnson Matthey 2015, S. 6–7))

Die Zellbauformen werden in der Literatur oft einander gegenübergestellt und anhand verschiedener Kriterien wie z.B. Sicherheit, Kosten, Energiedichte oder Integrationsaufwand gegeneinander bewertet, wobei die Autoren – je nach Betrachtungsfokus – zu

unterschiedlichen Einschätzungen kommen. Gegenwärtig gibt es in der Industrie und Wissenschaft keinen Konsens sich auf eine der drei Zellbauformen festzulegen und es finden nach wie vor alle Bauformen Verwendung (Löbberding & Wessel et al. 2020, S. 2). Welcher Zelltyp verwendet wird, hängt letztlich also nicht von der Bewertung mittels Gesamtkriterien-Katalog ab, sondern vielmehr von den kritischsten Anforderungen die der Anwendungsfall und das Gesamtsystem an die Zellbauform (Zelltyp) stellen (Birke 2014, S. 42–43; Hesse & Schimpe et al. 2017, S. 2).

Da sich diese Arbeit mit der Entwicklung eines flexiblen Stapelbildungsverfahrens beschäftigt und der Softpack naturgemäß ein höheres Maß an Flexibilität zulässt als ein Hardcase (Jansen & Amine et al. 2002, S. 29), wird im Folgenden genauer auf das Pouch-Design eingegangen.

Zelldesign einer Pouch-Zelle

Die Pouch-Zelle zeichnet sich grundsätzlich durch ihre hohen Freiheitsgrade in Bezug auf deren mögliche Ableiterpositionen und Gehäuseformen aus (Samba & Omar et al. 2014, S. 319; Michaelis & Rahimzei et al. 2018, S. 20; Jansen & Amine et al. 2002, S. 29). Darüber hinaus besteht die Pouch-Zelle aus vergleichsweise wenigen Komponenten, vgl. Abbildung 2-5, und bietet so auch Vorteile in Bezug auf die Fertigungskosten (Schröder & Aydemir et al. 2017, S. 108).

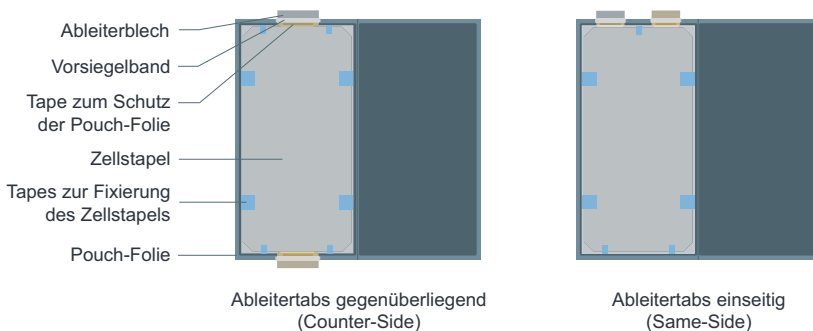


Abbildung 2-5: Exemplarischer Aufbau einer Pouch-Zelle

Zu den Komponenten einer Pouch-Zelle zählen die beiden **Ableiterbleche**, das **Vorsiegelband** (i.d.R. am Ableiterblech angebracht), der **Zellstapel** bzw. Zellverbund (bestehend aus Anode, Kathode und Separator), die **Tapes zur Fixierung** des Zellstapels

sowie die **Pouch-Folie** selbst, vgl. Abbildung 2-5 (Pettinger 2013, S. 225–228). In Großserienproduktionen werden meist zusätzliche **Tapes auf den Ableiterblechen** angebracht, um die Pouch-Folie vor Beschädigungen durch etwaige Grate zu schützen. Des Weiteren sind die Zellstapel in der Serienproduktion zu ihrer Identifikation oft mit QR-Codes versehen.

2.3.2 Verbundbauweisen von Zellstapeln

In diesem Unterkapitel wird eine begrenzte Auswahl gängiger Verbundbauweisen sowie die zur Herstellung notwendige Anlagentechnik vorgestellt. Wie in Bach (2017, S. 58) beschrieben, gibt es eine **Vielzahl an Möglichkeiten**, einen **Zellverbund aufzubauen**. Die Vielzahl an Verbundbauweisen liegt dabei zum Teil in den Schutzrechten der Hersteller bezüglich des Strukturaufbaus oder der Verfahrensführung begründet. Treiber für die Entstehung neuer Zellverbundbauweisen ist deren maßgeblicher Einfluss auf die Sicherheit, Lebensdauer, Leistung, Energiedichte und Kosten einer Batteriezelle (Ahn & Lee et al. 2004, S. 1; Löffberding & Wessel et al. 2020, S. 10–11). Darüber hinaus spielt die Zellgröße respektive Elektrodengröße eine wichtige Rolle bei der Wahl der Verbundbauweise und Anlagentechnik (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 294).

Aufgrund der Unschärfe bisheriger Klassifizierungen über die Elektrodenausführung (Kurfer & Westermeier et al. 2012a, S. 2) in Strukturaufbauten hat Bach (2017) eine **produktseitige** Definition auf Basis der Separatorstruktur innerhalb des Verbundes eingeführt und dabei insgesamt **13 verschiedene Verbundbauweisen** identifiziert (S. 59). **Prozesseitig** kann eine Unterteilung der **Verbundherstellungsverfahren** in eine übergeordnete Klassifikation – nämlich in Wickeln, Falten und Stapeln – in Anlehnung an die DIN 8593 und die zugrundeliegende Einteilung der Fügeverfahren bzgl. des Ordnungssystems erfolgen (Bach 2017, S. 65). Oftmals erfolgt auch eine simplifizierte Unterteilung in diskrete und kontinuierliche Materialbereitstellung (Schmitt & Raatz et al. 2014, S. 10).

In der Praxis entsteht ein Zellstapel einer bestimmten Verbundbauweise i.d.R. aus einer Kombination mehrerer Herstellungsverfahren, wobei auch diese wiederum sehr unterschiedlich ausgestaltet sein können. Abbildung 2-6 stellt die Herstellung sechs ausgewählter Verbundbauweisen mit Einzelblattelektroden dar.

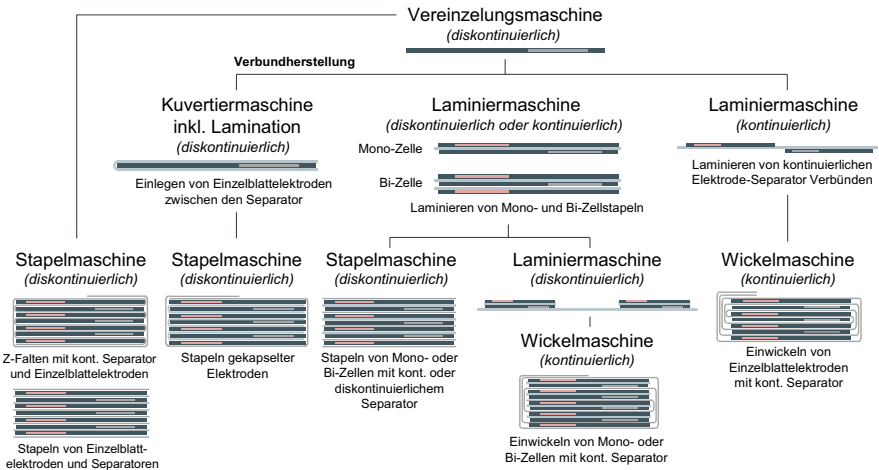


Abbildung 2-6: Exemplarische Darstellung der zur Herstellung eines Zellverbundes aus Einzelblattelektroden notwendigen Anlagentechnik

Initial liegen zur Verbundherstellung alle elementaren Zellbestandteile (Elektroden, Separator) als kontinuierliche Materialbahnen vor. Die individuelle Prozessführung des Herstellers entscheidet dann darüber, ob und wann die Materialbahn im Prozess vereinzelt wird. Generell ist zwischen der Prozessführung des Separators und der Elektroden zu unterscheiden. In Großserienproduktionen wird der Separator aufgrund gesteigerter Prozesssicherheit i.d.R. kontinuierlich oder im laminierten Verbund verarbeitet (Kurfer & Westermeier 2012a, S. 2; Springer & Frankenberger et al. 2020, S. 1).

Ist der Verbund hergestellt, spielt dessen Strukturaufbau für die Weiterverarbeitung in der Assemblierung eine wichtige Rolle. Abhängig vom Aufbau und Laminations-Anteil ändert sich die Steifigkeit des Stapels und wirkt so direkt auf die Herausforderungen in der Handhabungstechnik ein (Bhardwaj & Devan et al. 2013, S. 1; Michaelis & Rahimzei et al. 2020, S. 20). Eine hohe Steifigkeit ist für eine prozesssichere Handhabung und Weiterverarbeitung in großen Produktionen ein wichtiger Faktor, denn sie trägt zur Stabilisierung der Fertigungsprozesse bei und ist damit ein zentraler Stellhebel zur Erzielung von Kostendegressionen (Michaelis & Rahimzei et al. 2018, S. 20–28).

Neben der Steifigkeit des Stapels wird durch den Strukturaufbau auch ein unmittelbarer Einfluss auf die Freiheitsgrade beim Lagenaufbau und die möglichen Ableiterpositionen

genommen. Wickelnde Verfahren beschränken die Geometrie des Stapels grundsätzlich auf einen rechteckigen Querschnitt und legen eine einseitige bzw. gegenüberliegende Ableiterposition fest (Weinmann & Töpfer et al. 2020, S. 241).

Unabhängig vom konkreten Strukturaufbau gibt es allgemeine **Grundregeln, welche es für die Stapelbildung** zu beachten gilt.

- **Grundregel 1:** Die Anodenfläche muss in Bezug auf deren Kapazität immer größer ausgeführt sein als die Kathodenfläche (Son & Ryou et al. 2013, S. 644) und dieser in homogenem Abstand gegenüberliegen (Pettinger 2013, S. 221).
- **Grundregel 2:** Die Anodenfläche muss, durch den Separator, dauerhaft elektrisch von der Kathodenfläche getrennt werden (Pettinger 2013, S. 221).
- **Grundregel 3:** Jede Kathodenfläche muss vollständig von einer Anodenfläche überdeckt werden, um die Kapazität der Kathodenfläche voll auszunutzen und die Bildung von Lithium-Dendriten auf der Anodenseite – durch ungepaarte Flächen – zu verhindern (Pettinger 2013, S. 263; Song & Ryou et al. 2013, S. 644; Tang & Albertus et al. 2009, S. 390). Jede Anodenfläche wiederum muss vollständig von einer Separatorfläche überdeckt werden (Pettinger 2013, S. 263).

2.3.3 Optimierungsansätze Batteriezelle

Wie eingangs beschrieben, liegen die Treiber aller Optimierungsansätze in der Notwendigkeit die Sicherheit, Lebensdauer, Leistung und Energiedichte der Batteriezelle zu erhöhen und die Kosten für deren Herstellung zu senken (Ahn & Lee et al. 2004, S. 1; Löbberding & Wessel et al. 2020, S. 10–11). Die material- und prozessseitigen Optimierungsmaßnahmen wurden bereits in Kapitel 2.2.3 diskutiert, weshalb der Fokus nachfolgend auf die Verbundbauweise und das Zellformat gelegt werden soll.

2.3.3.1 Verbundbauweise (Stapelaufbau)

Für die nächsten Zellgenerationen ist neben der Materialentwicklung vor allem das Zell-design entscheidend (Pfleger 2017, S. 552). Die Zellverbundbauweise hat unmittelbaren Einfluss auf die oben genannten Treiber, wobei einzelne Optimierungsmaßnahmen i.d.R. mehrere Faktoren adressieren. Grundsätzlich zeichnet sich derzeit ein **Trend hin zu Stapelaufbauten und Laminaten** ab.

Unabhängig von der Führung des Separators innerhalb des Zellstrukturaufbaus, gibt es eine **Abwendung von gewickelten hin zu gestapelten Strukturaufbauten** – insbesondere im Bereich der Hochstromanwendungen (Rothermel & Winter et al. 2018, S. 12; Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 294). Dies liegt grundsätzlich in den Vorteilen in Bezug auf die volumetrische Energiedichte, den inneren Widerstand respektive einhergehende Wärmeentwicklung und der Zellalterung begründet, vgl. Abbildung 2-7.

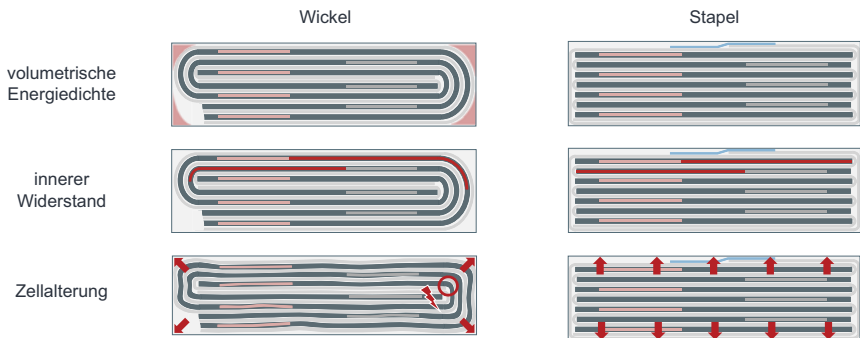


Abbildung 2-7: Vorteile eines Stapels gegenüber einem Wickel²

Eine Verbundbauweise aus Elektrodeneinzelblättern ermöglicht in prismatischen Gehäuseformen generell **höhere volumetrische Energiedichten** (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 294). Dies liegt in der besseren Ausnutzung des Bauraums im Randbereich begründet, vgl. Abbildung 2-7. Zudem erlaubt ein Aufbau aus Einzelblattelektroden den Einsatz dickschichtiger Elektroden, da keine kritischen Spannungen im Radius auftreten, welche zu Rissbildungen oder Abplatzungen führen (Schilling & Schmitt et al. 2016, S. 1502–1509; Kim 2015). Die in Kapitel 2.2 beschriebene Verbesserung des Aktivmaterial-Inaktivmaterial-Verhältnisses führt folglich zu einer weiteren Erhöhung der Energiedichte (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 294).

Ein Verbund aus gestapelten Einzelblattelektroden hat darüber hinaus den Vorteil, dass die Leiterlänge und damit der **elektrische Widerstand** geringer ist, was wiederum eine geringere Wärmeentwicklung zur Folge hat. Ein symmetrischer Zellaufbau ermöglicht zudem homogenere Stromdichten und gleichmäßigere Temperaturverteilungen innerhalb des Zellverbundes. (Samba & Omar et al. 2014, S. 329)

² <https://lghomebatteryblog.eu/aus-diesem-grund-ist-nmc-die-zu-bevorzugende-chemie-fuer-li-ionen-batterien>

Die zyklischen und kalendarischen positiven Volumenänderungen des Materials beim Betrieb der Zelle führen bei gewickelten Verbundbauweisen zu einem Hineinbewegen des Materials in die vorhandenen Hohlräume des Gehäuses, was zur **Welligkeit** der Elektroden führt. Diese Welligkeit begünstigt, aufgrund der heterogenen Abstände von Anode zu Kathode und des ungleichen mechanischen Drucks, weitere Alterungseffekte. (Zheng & Li 2016, S. 278–281; Loveridge & Remy et al. 2018, S. 9)

Neben dem eigentlichen Strukturaufbau gibt es einen Trend zur **Laminierung von Zwischenprodukten** (Heimes & Kampker et al. 2018, S. 3) **und/oder Endprodukten**.

Aus dem Blickwinkel der Produktion sind eine genaue Positionierung der Einzellagen sowie die Wahrung des hergestellten Ordnungszustandes wesentlich. Neben den eingangs beschriebenen Herausforderungen, spielen dabei auch die steigenden Zellkapazitäten eine Rolle. Diese drücken sich u.a. in einer höheren Anzahl an Elektroden- und Separatorlagen aus, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Defekten in Bezug auf Ausrichtungsfehler im Zellstapel steigt (Jung & Park et al. 2018). Die Stapelung laminiertes Verbünde, bspw. von Mono- oder Bi-Zellen, kann diese Problematiken adressieren und zudem eine höhere Positioniergenauigkeit ermöglichen (Jung & Park et al. 2018). Alternativ kann auch ein Laminieren im Anschluss an die Assemblierung, bspw. durch Heißpressen, erfolgen. Die so geschaffene monolithische Einheit ist ebenfalls weniger anfällig für Ausrichtungsdefekte, allerdings erst in den folgenden Montageschritten (Babinec & Less et al. 2014, S. 1). Da der Separator sehr wärmeempfindlich ist, kann es im weiteren Assemblierungsprozess, bspw. beim Ableiterschweißen oder Siegeln, zu hohen Temperatureinwirkungen kommen. Die Verarbeitung laminiertes Elektroden, Verbünde oder Monolithe sorgt für eine Fixierung der Separatorlagen im Zellverbund und kann einem unkontrollierten Schrumpfen des Separators vorbeugen, vgl. Abbildung 2-8 (Yang & An et al. 2018).



Abbildung 2-8: Kapselung von Elektroden und Zellstapeln

2.3.3.2 Zellformat

Neben den eingangs dargestellten material- und prozesseitigen Optimierungen stellt die Zellgröße selbst eine mögliche Optimierungsrichtung dar.

Ursprünglicher Treiber für die Kommerzialisierung der Lithium-Ionen Technologie war die Unterhaltungsindustrie zu Beginn der 1990er-Jahre. Damals wurden vermehrt kleine Batteriezellen zur Befähigung mobiler Anwendungen (Mobiltelefone, Notebooks etc.) entwickelt und in Serie produziert (Leuthner 2013, S. 13). Die Leistungsfähigkeit der neuen Technologie ermöglichte die stetige Erschließung neuer und energieintensiverer Anwendungsfelder, wodurch auch die Kapazität und Zellgröße stetig zunahm.

Gegenwärtiger Treiber ist die Automobilindustrie, welche über eine weitere Erhöhung der Zellgröße versucht die Inaktivmaterialanteile zu reduzieren und so Energiedichte und Kosten zu optimieren (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 298). Ein größeres Zellformat hat darüber hinaus den Vorteil, dass die Anzahl der zu integrierenden Zellen auf Modulebene sinkt, was den Montageaufwand senkt und die Energiedichte auf Batteriemodul und Batteriepackebene erhöht (Samba & Omar et al. 2014, S. 319).

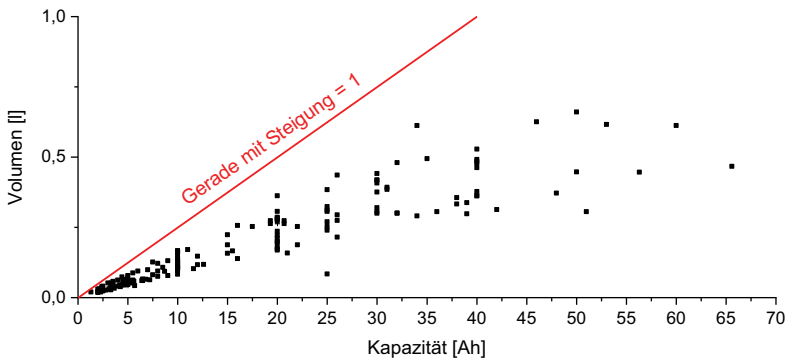


Abbildung 2-9: Zusammenhang von Zellvolumen und Kapazität (vgl. Anhang A)

Abbildung 2-9 zeigt den Zusammenhang von Zellvolumen und Kapazität. Die Recherche basiert auf 170 Pouch-Zellen unterschiedlichster Anwendungsfelder und veranschaulicht die Vorteile größerer Zellformate in Bezug auf die volumetrische Energiedichte – enthalten sein können auch materialseitige Optimierungen. Der Trend zu höheren Kapazitäten, respektive Zellgrößen, bedeutet wiederum eine Vergrößerung der Elektrodenflächen und hat somit auch direkten Einfluss auf die Anlagentechnik.

2.3.4 Marktübersicht Zellformate

Der in Kapitel 2.3.1 thematisierte fehlende Konsens sich in der Industrie und in der Wissenschaft auf eine Zellbauform festzulegen, setzt sich in der Etablierung von Standardzellformaten fort (Schmuck & Wagner et al. 2018, S. 276). Seitens der Normungsorganisationen DIN und ANSI wurden zwar Anstrengungen zur Definition von Standards unternommen (PHEV1-, PHEV2-, BEV1,-BEV2 oder auch 18650-Zellen), allerdings haben sich diese am Markt nicht bindend durchsetzen können (Bach 2017, S. 46). Dies liegt, wie skizziert, an den stark heterogenen Anforderungen der Anwendungsfälle (Hesse & Schimpe et al. 2017, S. 2), den unterschiedlichen Präferenzen der Hersteller (Liu & Zhang et al. 2021, S. 2) sowie den bis dato andauernden kontinuierlichen Optimierungen des Zell-Designs (Pfleger 2017, S. 552).

Da sich die vorliegende Dissertation mit der Entwicklung eines flexiblen Stapelbildungsverfahrens beschäftigt, soll nochmals genauer auf die am Markt erhältlichen und folglich auch potenziell nachgefragten Zellformate eingegangen werden. Zwar steht die Pouch-Zelle aufgrund ihrer Gehäuseflexibilität im Vordergrund, da aber Pouch- und prismatische Zellen in einigen Anwendungsfällen substituiert werden können, erfolgt nachfolgend zunächst eine Betrachtung beider Zellbauformen, vgl. Abbildung 2-10.

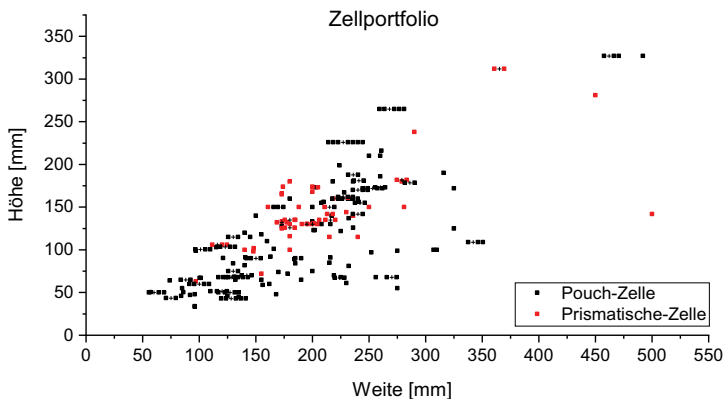


Abbildung 2-10: Abmessungen von 243 Zellen (vgl. Anhang A)

Die Recherche aktueller am Markt erhältlicher Zellformate deckt sich weitestgehend mit den Erkenntnissen von Bach (2017, S. 47), welcher ein Spektrum für die Weite und Höhe von 80 bis 255 mm bei der prismatischen und 100 bis 450 mm bei der Pouch-Zelle identifiziert hatte. Das **Spektrum von Pouch-Zellen ist folglich größer** als das

prismatischer Zellen. Die nachfolgende Korrelationsanalyse betrachtet die Zusammenhänge nochmals im Detail. Da die Position der Ableiter bei Pouch-Zellen in unterschiedlichen Konfigurationen vorliegen kann, vgl. Kapitel 2.3.1, ist „Weite“ stets als die längere und „Höhe“ stets als die kürzere Seite definiert.

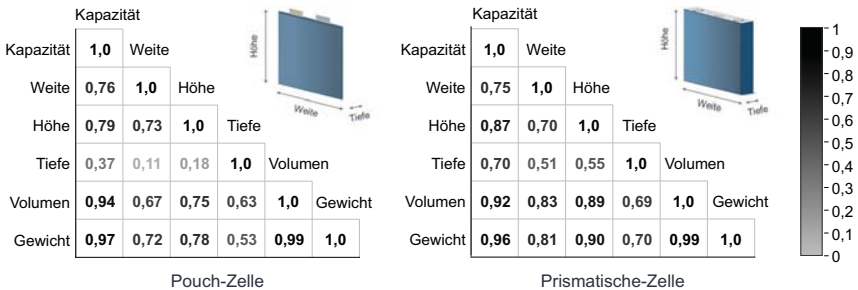


Abbildung 2-11: Korrelationsanalyse von Pouch- und prismatischen Zellen

Abbildung 2-11 veranschaulicht, dass die **Kapazität der Pouch-Zelle** insbesondere von der **Veränderung der Elektrodenfläche** abhängt. Die Tiefe korreliert nur schwach mit der Kapazität, da diese prozesseseitig nicht beliebig erhöht werden kann und so verhältnismäßig schnell ihr Maximum erreicht. Bei der prismatischen Zelle befinden sich i.d.R. mehrere Zellverbünde im Zellgehäuse, folglich kann die Kapazität auch durch die Erhöhung der Anzahl der Verbünde erhöht werden, was sich in einer stärkeren Korrelation der Tiefe des Zellgehäuses mit der Kapazität widerspiegelt. Eine genauere Analyse erfolgt in Kapitel 4 zur Ableitung der Spezifikationen für das flexible Stapelbildungsverfahren.

2.4 Industrieller Zellherstellungsprozess

Die Literatur im Bereich der Batteriezellherstellung beschäftigt sich primär mit der Entwicklung und Untersuchung von Materialien sowie der Neu- und Weiterentwicklung alternativer Herstellungsverfahren. Ausführungen zur Prozessführung und Anlagentechnik beziehen sich dabei i.d.R. auf die vorhandenen Labor- und Pilotanlagen der jeweiligen Forschungseinrichtungen. Über das industrielle Umfeld ist nur sehr wenig bekannt. Diese Einschätzung teilen auch Westphal & Bockholt et al. (2015, S. 57).

Zur Adressierung dieses Defizits setzt der folgende Stand der Technik deshalb, wie eingangs beschrieben, ergänzend auf eigenen Recherchen auf. Informationen und

Kennzahlen zur Prozessführung und Anlagentechnik wurden über den Besuch asiatischer Fachmessen akquiriert und in einer **Datenbank**, bestehend aus **409 Anlagen von 66 Herstellern**, konzentriert und ausgewertet. Zur Stützung der Erkenntnisse wurden ergänzend Industrie-Patente diverser Hersteller recherchiert und an den entsprechenden Stellen eingebunden.

2.4.1 Gesamtprozesskette

Wie in Kapitel 2.3.3 skizziert, sind kommerzielle Batteriezellen teils mit einer Reihe unterschiedlicher Sicherheitsmerkmale (z.B. zusätzliche Beschichtungen oder Tapes am Ableiter) versehen, um einen sicheren Betrieb über den Lebenszyklus zu gewährleisten. Ferner gibt es diverse Maßnahmen zur Optimierung von Energiedichte (z.B. durch Wing-Folding), Qualität und Leistung (z.B. durch Heißpressen) sowie zur Durchsatzsteigerung (z.B. durch Funktionsintegration). Zur Umsetzung dieser Maßnahmen sind jeweils eigene Anlagen sowie deren Verkettung notwendig. Aufgrund der **weniger komplexen Produkte aus Labor** und Pilotlinien, gestaltet sich dementsprechend auch deren **Prozesskette einfacher**. Zudem sind Prozesse in Großserienproduktionen stets vollautomatisiert und werden von einer Reihe engmaschiger Qualitätssicherungsschritte (z.B. Röntgen) begleitet. Abgesehen von der Größe der Anlagen, unterscheiden sich die Produktionen folglich stark in der Anzahl durchzuführender Prozess- und Prüfschritte sowie im Automatisierungsgrad. Dies bedingt eine Reihe zusätzlicher Problemstellungen sowie eine generelle Komplexitätszunahme in großen Serienfertigungen.

Abgesehen von den Unterschieden in der Prozesskette gibt es, wie in Kapitel 2.3.2 angedeutet, diverse Möglichkeiten der Prozessführung. Diese ist u.a. abhängig vom Zelltyp, dem Strukturaufbau des Zellstapels, vorhandenen Schutzrechten sowie dem eingesetzten Anlagentyp. In der Literatur wird oft eine allgemeingültige Unterteilung in die drei Bereiche Elektrodenherstellung, Zellausbauelemente und Aktivierung vorgenommen, wobei die Bezeichnungen teilweise abweichend gewählt sein können (Pettinger & Kampker et al. 2018, S. 212; Liu & Zhang et al. 2021, S. 2). In der Industrie findet oft eine Unterteilung in die Bereiche Front-, Mid- und Back-End statt. Diese Klassifizierung hat den Vorteil, dass sie keine zeitliche Abfolge impliziert und damit eine widerspruchsfreie Einordnung der Einzelprozessschritte in die Prozesskette erlaubt.

Abbildung 2-12 zeigt eine beispielhafte Prozesskette zur Herstellung einer Pouch-Zelle.

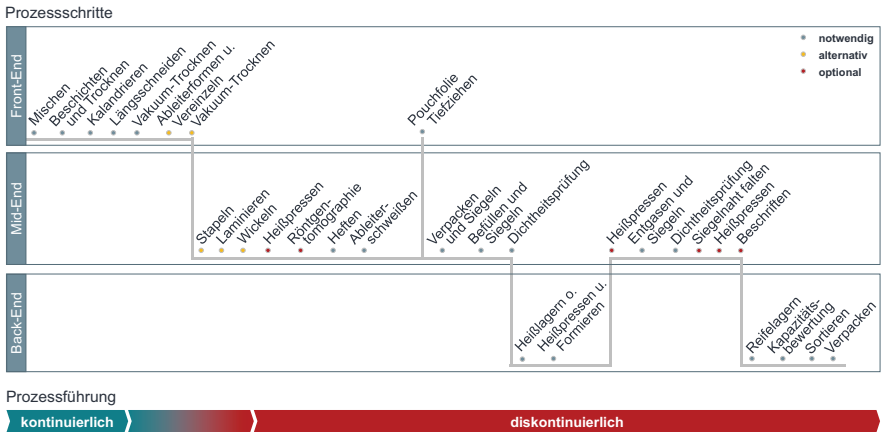


Abbildung 2-12: Prozessschritte zur Herstellung einer Pouch-Zelle

Darüber hinaus kann eine **Unterteilung anhand der Prozessführung in kontinuierliche und diskontinuierliche Prozessschritte** erfolgen (Fleischer & Weinmann et al. 2021, S. 7–12). Kontinuierliche Prozesse kennzeichnen sich i.d.R. durch die Verwendung von Rolle-zu-Rolle Anlagen, welche sich durch eine hohe Effizienz und einen hohen Durchsatz auszeichnen (Liu & Zhang et al. 2021, S. 3). Diskontinuierliche Prozesse bestehen hingegen aus getakteten Maschinen bzw. Linien. Bei der Planung einer Produktionslinie bedarf es stets einer **optimalen Auslegung der beiden Verfahrensarten** zueinander.

Um Querkontamination zu vermeiden, kennzeichnet sich eine Serienproduktion außerdem durch mindestens **zwei getrennte Prozessstränge bis zur Zellstapelbildung** (Schmitt & Raatz et al. 2014, S. 10) und typischerweise mehrere Linien in der Assemblierung und Aktivierung. Jede Linie besteht, aufgrund der teils stark unterschiedlichen Produktionskapazitäten der Anlagen, wiederum aus meist **mehreren Anlagen pro Prozessschritt**.

Die nachfolgende Tabelle ist eine überschlägige Abschätzung der benötigten Anlagenanzahl für die Produktion einer 25 Ah Pouch-Zelle bei einem Output von 4 GWh/Jahr (~ 42 Mio. Zellen/Jahr). Die Berechnung erfolgte auf Basis der eingangs angesprochenen Anlagendatenbank in einer Konfiguration aus leistungsstarken Anlagen. Aufgrund der starken Abhängigkeit der Anlagenanzahl vom Anlagentyp bzw. dessen Produktionsoutput sowie vom Zellformat sind die Werte als exemplarisch zu begreifen.

Tabelle 2-1: Auszug berechneter Anlagenanzahl über die Prozesskette

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|---------|-------------|--------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------|-----|
| Mischen | Beschichten & Trocknen | Kalandrieren | Längsschneiden | Vakuumtrocknen | Ableiterformen | Stapeln | Heißpressen | Röntgen Test | Pouchfolie tiefziehen | Heften u. Ableiterschweißen | Verpacken und Siegeln | Befüllen und Siegeln | ... |
| 4 | 2 | 2 | 2 | 7 | 6 | 84 | 6 | 9 | 30 | 9 | 9 | 9 | ... |

Abbildung 2-12 und Tabelle 2-1 vermitteln einen vagen Eindruck hinsichtlich der Komplexität einer Zellfertigung. Die **hohe Anzahl an Prozessschritten** und Einzelanlagen sowie die **Heterogenität in der Prozessführung**, führen zu einer **Vielzahl unbekannter Abhängigkeiten** in einer Zellproduktion. Die Komplexität äußert sich im Allgemeinen in einem Over-Engineering der Produktionslinie, exzessiven Qualitätskontrollen sowie hohen Ausschussraten. (Westermeier & Reinhart et al. 2014, S. 13)

Eine Prozesskette bestehend aus 25 Prozessschritten in Front-, Mid- und Back-End, wie in Abbildung 2-12 dargestellt, hätte bei einer Prozessausbeute von 99 % pro Prozessschritt lediglich eine Gesamtausbeute von 77,8 %. Da Defekte oft erst nach der Formierung erkannt werden, entstehen hohe Verluste, weil bereits eine Reihe werterschöpfender Prozesse erfolgt ist. (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 297)

Für eine **kostengünstige und wettbewerbsfähige Produktion** ist die Minimierung von Produktionsausschüssen über die Prozesskette von besonderer Bedeutung (Kriegler & Binzer et al. 2020, S. 2). Diese kann über eine **Steigerung der Qualität der Zwischenprodukte** (Kriegler & Binzer et al. 2020, S. 2) sowie eine **Verkürzung der Prozesskette**, bspw. über die Integration mehrerer Prozessschritte in eine Anlage, erfolgen.

An dieser Stelle ist es nochmals wichtig zu betonen, dass für die jeweiligen Zelltypen **keine allgemeingültigen Prozessschritte und Fertigungsabfolgen** existieren. Die Kompetenz der Hersteller liegt in der vom Strukturaufbau abhängigen Optimierung der Fertigungsabfolge, der produktbezogenen Optimierung bzw. Abwandlung etablierter Prozessschritte sowie dem Einbau qualitätsverbessernder Zwischenschritte zur Steigerung der Qualität und des Durchsatzes und dadurch der Senkung des Ausschusses und der Herstellungskosten.

2.4.2 Vorstellung ausgewählter Einzelprozessschritte

Im Folgenden wird genauer auf die Einzelprozessschritte in der Batterieproduktion eingegangen. Aufgrund des Einflusses der Prozessschritte aus dem Front-End auf die Stapelbildung, soll der **Fokus auf dem Front-End** liegen (exklusive Pouch-Folie tiefziehen). Die Prozessschritte Vereinzelung und Stapelbildung werden in Kapitel 2.5 gesondert betrachtet, da diese Teil des zu entwickelnden Anlagenmoduls sind.

Die Beschreibung der Prozesse erfolgt aus der Sicht der Prozess- und Anlagentechnik. Dabei soll insbesondere auf die Materialführung und Handhabung, Prozessgeschwindigkeiten und erzielbare Genauigkeiten sowie auf die generellen Herausforderungen in den jeweiligen Prozessschritten eingegangen werden. Die angegebenen Parameter entstammen u.a. den Herstellerangaben und entsprechen nicht zwangsläufig den im Prozess angewandten Parametern. Sie geben vielmehr eine Orientierung über die anlagenseitigen Prozessfähigkeiten und -grenzen, die letztendlich aber immer durch das konkrete Produkt festgelegt werden.

2.4.2.1 Mischen

Der Mischprozess lässt sich grundsätzlich in das Trocken- und Nassmischen untergliedern, wobei innerhalb der beiden Bereiche wiederum unterschiedliche Verfahrensführungen und Technologien angewendet werden können (Bockholt & Indrikowa et al. 2016, S. 141; Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 292).

Im Trockenmischprozess erfolgt in erster Linie das Vermischen und Strukturieren von Leitadditiven (Ruß) und Aktivmaterialien (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 292). Dies dient unter anderem dazu, ein Ruß-Netzwerk zur Sicherstellung der elektrischen Leitfähigkeit innerhalb der Aktivmaterialschiicht und zum Stromsammler herzustellen. Aufgrund der schlechteren Leitfähigkeit der Kathodenaktivmaterialien ist dies vor allem auf Kathodenseite von Relevanz, wohingegen auf Anodenseite eine ausreichende Leitfähigkeit durch den Graphit gewährleistet ist. (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 3–4)

Im Nassmischprozess erfolgt ein Dispergieren der im Trockenmischprozess vorge-mischten Pulver mit der Binderlösung, wobei dieser in die drei Phasen „Kneten – Verdünnen – Entgasen“ unterteilt werden kann. Das Kneten erfolgt mit hoher Intensität und Viskosität, wodurch dies den eigentlichen Mischvorgang darstellt. Anschließend wird die Paste mit Lösemittel verdünnt, um die gewünschte Rheologie (Lösemittelgehalt,

Viskosität) einzustellen. Abschließend erfolgt ein Entgasungsschritt, um Lufteinschlüsse aus der Paste zu entfernen. (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 4; Schünemann 2015, S. 18)

Die Prozessführung (Mischreihenfolge, Technologie etc.) beim Mischen hat, neben den Auswirkungen auf die spätere Zellperformance, einen maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften (z.B. Reißfestigkeit) der Elektrode (Bockholt & Haselrieder et al. 2016, S. 266; Liu & Zhang et al. 2021, S. 5). Dabei spielt neben der eigentlichen Verteilung (Lestriez 2010, S. 1349; Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 3) auch der Zustand des Binders eine wichtige Rolle, denn hohe Mischintensitäten können zu einer Verkürzung der molekularen Kettenlänge und so ebenfalls zu einer negativen Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften der Elektrode führen (Haselrieder & Westphal et al. 2015, S. 6). Das Mischen, insbesondere das Nassmischen unter Anwesenheit des Binders, spielt folglich eine bedeutende Rolle in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften der Elektrode und somit deren Verarbeitbarkeit (Materialführung, Verinselung etc.) im weiteren Prozessverlauf.

Gegenwärtig werden in den Produktionen meist großvolumige Planetenmischer eingesetzt (Liu & Zhang et al. 2021, S. 4), welche über Förderanlagen und Tanksysteme an den Beschichtungsprozess angebunden sind (Heimes & Kampker et al. 2018, S. 3). Die Arbeitsvolumen großer Anlagen belaufen sich in etwa auf 2000 Liter. Die Prozesse sind, wie eingangs erwähnt, für den Anoden- und Kathoden-Slurry strikt getrennt, um Querkontamination zu vermeiden (Heimes & Kampker et al. 2018, S. 3).

2.4.2.2 Beschichten und Trocknen

Obwohl es sich beim Beschichten und Trocknen um zwei grundsätzlich verschiedene Prozesse handelt, finden diese – aufgrund der schlechten Lagerfähigkeit nassbeschichteter Elektrodenbahnen – unmittelbar hintereinander und in derselben Anlage statt. Eine Betrachtung der Prozesse ist folglich nur in Kombination sinnvoll (Westphal & Bockholt et al. 2015, S. 57). Nachfolgend soll auf die Herausforderungen der beiden Prozessschritte und die am Markt befindliche Anlagentechnik eingegangen werden.

Beschichtungsprozess

Bei den **Beschichtungsverfahren** wird zwischen vor- und selbstdosierenden Verfahren unterschieden, wobei die Schlitzdüse zum ersteren und die Rakel (auch „doctor blade“) zum letzteren Verfahren zählt (Röth & Kampker et al. 2018, S. 353). Das in der

Industrie seit längerem dominierende Verfahren ist die Beschichtung mittels Schlitzdüse (englisch slot-die), da diese sehr präzise Schichtdicken sowie unterbrochene (intermittierende) Beschichtungen ermöglicht (Schmitt & Baunach et al. 2012, S. 32; Kwade & Haselrieder 2018, S. 293). Darüber hinaus lässt die Schlitzdüsen-Technologie höhere Beschichtungsgeschwindigkeiten zu (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 5), was insbesondere im Kontext einer Serienfertigung relevant ist. Verfahrensunabhängig ist ein präzises Einstellen der Rheologie der Paste im Mischprozess (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 4–5) auf die geforderte Nassfilmdicke, die Beschichtungsgeschwindigkeit und konkrete Verfahrensumsetzung notwendig (Schmitt 2015, S. 8–10).

Für eine hohe **Beschichtungsqualität** ist im Allgemeinen eine saubere Ausprägung der jeweils begrenzenden Minisken verantwortlich (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 5–6). Für die Beschichtungsänder gilt, dass selbst unter optimalen Einstellungen keine ideale Rechteckform erzielt werden und es zu Randüberhöhungen oder auslaufenden Geometrien kommen kann (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 7). Dies kann bei der Detektion und Ausrichtung der Beschichtungskante für den Beschichtungsauftrag auf der Rückseite bei doppelseitiger Beschichtung relevant sein. Bei intermittierend ausgeführten Beschichtungen ist zudem die Qualität der Start- und Stoppkanten relevant. Diese ist vom Fließverhalten (Einstellung der Rheologie) sowie der Beschichtungsdicke und -geschwindigkeit abhängig (Diehm & Weinmann et al. 2019, S. 2–5).

Bei kontinuierlichen Beschichtungen ist die **Beschichtungsgeschwindigkeit** im Allgemeinen weniger durch die Beschichtungsqualität als durch die maximal verfügbare Trocknungszeit limitiert – mehr dazu im nächsten Abschnitt. Bei der diskontinuierlichen Beschichtung ist die Beschichtungsgeschwindigkeit stärker durch die erzielbaren Beschichtungsqualitäten limitiert. Dies liegt an der Diskontinuität des Prozesses und dem Einfluss der Bahngeschwindigkeit auf die Qualität der Start- und Stoppkanten der Beschichtung (Schmitt & Scharfer et al. 2013, S. 63). Je nach Anforderung kann es, unabhängig von den technischen Möglichkeiten der Anlage, zu einer deutlichen Reduktion der Beschichtungsgeschwindigkeit kommen (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 295).

Trocknungsprozess

Bei den **Trocknungsverfahren** wird im Wesentlichen auf die konvektive Trocknung in Rollen- (Liu & Zhang et al. 2021, S. 6) oder Schwebebahntrocknern gesetzt. Oftmals werden hybride Systeme, bestehend aus Infrarotstrahlern und konvektiver Trocknung, eingesetzt (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 298).

Die **Qualität** der Filmtrocknung wird maßgeblich von der Trocknungsrate beeinflusst, welche u.a. an die Trocknungstemperatur und Strömungsbedingungen im Ofen gebunden ist (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 8). Die Trocknungstemperatur kann dabei nicht beliebig gesteigert werden, da hohe Temperaturen zu Inhomogenitäten, insb. Bindermigration an die Oberfläche, führen (Westphal & Bockholt et al. 2015, S. 61–62). Aus Sicht der Produktionstechnik führen Inhomogenitäten zu einer Schwächung der mechanischen Eigenschaften der Elektrode (Westphal & Bockholt et al. 2015, S. 67) und können Beschichtungsrisse oder gar ein Ablösen der Schicht vom Stromsammler zur Folge haben (Müller & Pfaffmann et al. 2017, S. 2). Eine Strategie zur Reduktion der Trocknungszeit unter Vermeidung von Inhomogenitäten besteht darin, die Schicht zu Beginn der Trocknungsstrecke schnell aufzuheizen, die Temperatur danach zu reduzieren und erst gegen Ende wieder anzuheben (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 297; Liu & Zhang et al. 2021, S. 7).

Die **Trocknungsgeschwindigkeit** ist durch die geforderten Qualitäten und die Dauer der Nassfilmtrocknung begrenzt (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293). Dabei ergibt sich die Trocknungsdauer aus dem Quotienten von Trocknerlänge und Bahngeschwindigkeit. Längere Trockneröfen ermöglichen höhere Bahngeschwindigkeiten bei identischer Trocknungsrate, führen allerdings zu großen Flächenbedarfen und Problemen beim Bahntransport. Besonders bei Formulierungen mit NMP (N-Methyl-2-pyrrolidon) als Lösemittel, gestaltet sich die Trocknung aufgrund des hohen Siedepunkts des NMPs von 202 °C sehr zeit- und energieintensiv (Liu & Zhang et al. 2021, S. 6). Im Allgemeinen wird die Trocknungsdauer mit ein bis zwei Minuten angegeben (Jaiser & Friske et al. 2017, S. 1268–1270; Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293).

Anlagentechnik

Der Verfahrensablauf gestaltet sich generell so, dass die Pasten aus dem Mischprozess über ein geeignetes Beschichtungsverfahren auf die Kollektorfolie aufgebracht und anschließend getrocknet werden. Die Beschichtung erfolgt i.d.R. zunächst einseitig und muss nach der Trocknung analog für die zweite Seite durchgeführt werden. In der Serienproduktion wird dies meist über zwei Beschichtungsstationen und Doppelstocktrockner realisiert – vgl. Abbildung 2-13.

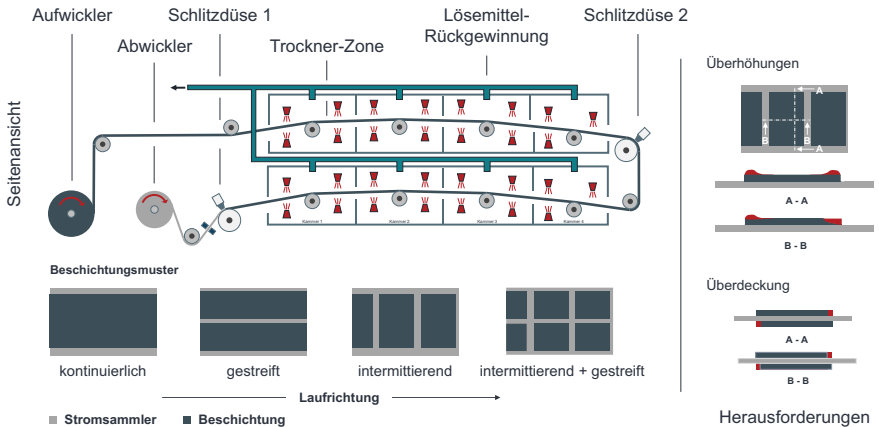


Abbildung 2-13: Exemplarische Prozessführung und Herausforderungen beim Beschichten und Trocknen (in Anlehnung an (Diehm & Weinmann et al. 2019, S. 2))

Wie in Abbildung 2-13 dargestellt, kann der Beschichtungsauftrag **kontinuierlich**, **gestreift**, **intermittierend** oder in der Kombination **intermittierend und gestreift** erfolgen. Welches Beschichtungsmuster gewählt wird, hängt vom Zelldesign und der Verfahrensführung in der Vereinzelung und Stapelbildung ab (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293). Die Beschichtungsbreite entspricht etwa der späteren Elektrodenbreite in der Zelle bzw. einem Vielfachen davon. Aufgrund der hohen Folienbreiten in kommerziellen Anlagen werden meist mehrere Streifen nebeneinander aufgetragen. Die Anzahl paralleler Beschichtungsstreifen hängt wiederum von der Beschichtungs- und Ableiterbreite (Zelldesign) sowie der maximal möglichen Folienbreite (Anlagendesign) ab. Die Effizienz ist folglich sowohl von der Anlage selbst als auch vom Zelldesign (Beschichtungsbreite) abhängig.

Für die **Bahngeschwindigkeit** geben die Hersteller oft einen Bereich bzw. die maximal mögliche Anlagengeschwindigkeit an. Eine Aussage über die tatsächliche Prozessgeschwindigkeit ist nicht möglich, da diese stark von den eingangs beschriebenen Effekten abhängt. Grundsätzlich gilt der Zusammenhang, dass eine Erhöhung der Beschichtungsgeschwindigkeit – ceteris paribus – zu einer steigenden Trocknerlänge führt (Westphal & Bockholt et al. 2015, S. 57).

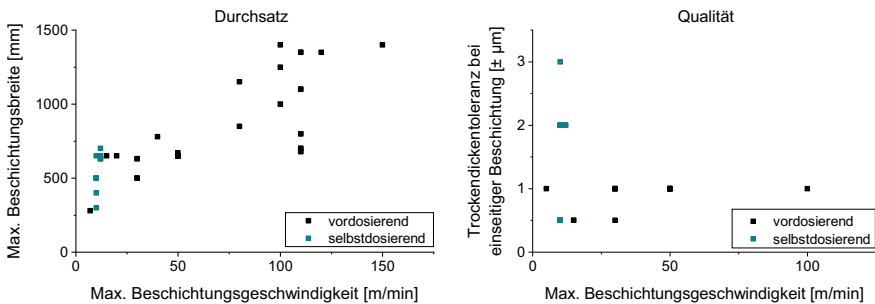


Abbildung 2-14: Zusammenhang zwischen Beschichtungsbreite und -geschwindigkeit sowie Trockendickentoleranz und Beschichtungsgeschwindigkeit

Die in der Literatur beschriebene höhere Qualität und Prozessgeschwindigkeit vordosierender Verfahren, spiegelt sich auch in der Auswertung der Herstellerangaben wider, vgl. Abbildung 2-14. Die Trockendickentoleranz selbstdosierender Verfahren liegt etwa um den Faktor zwei bis drei über denen der vordosierenden Verfahren. Die Geschwindigkeit selbstdosierender Verfahren wird mit max. 31 m/min angegeben, während vordosierende Verfahren mit bis zu 105 m/min angegeben werden – errechnet über die angegebenen Trocknerlängen unter Annahme einer einminütigen Trocknungsdauer.

Die einseitige Schwankung der Trockenschichtdicke wird herstellerseitig mit ± 1 bis $\pm 3 \mu\text{m}$ angegeben, die Schwankung des Flächengewichtes mit ± 1 bis $\pm 1,5 \%$. Bezüglich des Beschichtungsauftrages liegt die Breitentoleranz bei $\pm 0,3$ bis $\pm 0,5 \text{ mm}$. Der Beschichtungsversatz der finalen beidseitigen Beschichtung wird mehrheitlich mit $\pm 0,4$ bis $\pm 0,5 \text{ mm}$ angegeben. Die Rand-zu-Mitten-Dickentoleranz liegt bei ± 5 bis $\pm 8 \mu\text{m}$.

Die realisierbaren Beschichtungsbreiten liegen üblicherweise im Bereich zwischen 650 und 1400 mm. Die herstellerseitig angegebenen Geschwindigkeiten liegen zwischen 35 und 120 m/min. Diese sind jedoch, aufgrund der eingangs geschilderten Abhängigkeiten, als Maximalgeschwindigkeiten der Antriebe zu verstehen und werden von den Herstellern deshalb oft als „maximale mechanische Geschwindigkeit“ bezeichnet.

Die Trockner sind in Modulbauform zu beziehen, die Länge eines Ofenabschnittes beträgt, abhängig von der Anlagengröße, zwischen 3 und 5 m für große Anlagen, worauf sich der Platz für die Beschichtungsstation addiert. Die Trocknerlänge wird durch die zu führende Bahnlänge im Trockner begrenzt. Begründet liegt letzteres in den steigenden Anforderungen an eine präzise Walzensynchronisation und an dem Bahnverhalten (Schüsseln), welche in Kombination Folienrisse, wie in Kwade & Haselrieder (2018)

beschrieben, hervorrufen können. Die Trocknerlänge wird in Heimes & Kampker et al. (2018, S. 7) mit bis zu 100 m angegeben und deckt sich mit den recherchierten Herstellerangaben (bis zu 105 m Gesamtanlagenlänge).

Zur Sicherstellung einer hohen Qualität erfolgen eine kontinuierliche Nassfilmdickenmessung mittels Ultraschall und/oder Beta-Strahler sowie eine Trockendicken- und Beschichtungskantenmessung mittels Laser (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293). Während des Trocknungsverlaufes erfolgen eine kontinuierliche Temperaturüberwachung der Elektrodenoberfläche, Lösemittelkonzentrationsbestimmung sowie eine Volumenstrommessung im Ofen. Defekte innerhalb der Schicht werden mittels Infrarot und/oder Kamerasystemen erkannt und markiert. Bei langen Trocknerlängen erfolgt zudem eine präzise Momentenüberwachung der Antriebe.

2.4.2.3 Kalandrieren

Die Kalandrierung dient der Erhöhung der volumetrischen Energiedichte. Sie verbessert die Homogenität und im Allgemeinen auch die Eigenschaften (z.B. Adhäsion, Elastizität, mech. Festigkeit) der Elektrode (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 297). Die Beschichtungsdichte ρ wird dabei für die Anode von eingangs $0.9\text{--}1.2\text{ g/cm}^3$ auf $1.4\text{--}1.7\text{ g/cm}^3$ und für die Kathode (NCM) von $2.2\text{--}2.6\text{ g/cm}^3$ auf etwa $2.8\text{--}3.4\text{ g/cm}^3$ erhöht (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293). Je nach Elektrode erfolgt eine Reduzierung der Dicke auf 70 bis 90 % der Ausgangsdicke (Kitajima & Motoi et al. 2017).

Eine hohe Genauigkeit der Dichte bzw. Dicke ist beim Kalandrieren besonders relevant, da sich Toleranzen über die Stapelhöhe aufaddieren und so ggf. zu vorzeitigen Alterungserscheinungen führen können, vgl. Kapitel 2.3.3.1 (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 9). Aufgrund hoher Prozesskräfte mit einhergehenden anlagenseitigen Verformungen (Kalanderwalze, Maschinengestell etc.) ist dieser Vorgang allerdings nicht trivial und es bedarf einer Reihe prozess- und anlagenseitiger Gegenmaßnahmen. Hohe Verdichtungsraten führen zu mehr Defekten und folglich Ausschuss und stehen im Konflikt mit dem Ziel der Kostenreduktion (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 1–2).

Ein Kalender besteht meist aus vier Zonen, welche sich über den dort anliegenden Bahnzug definieren. Für die Qualität des Endproduktes beim Kalandrieren sind insbesondere die Zugwerke vor und hinter dem Walzwerk bedeutsam. Diese stützen die Bahnzugkraft üblicherweise nicht über Anpresswalzen, sondern ein System aus Umlenkwalzen ab, welche über Traktionsriementriebe, Kettentriebe oder mehrere Servo-

Die maximale Verarbeitungsbreite (nicht Walzenbreite) liegt vorherrschend im Bereich zwischen 400 und 750 mm, die maximalen Kräfte im Bereich zwischen 300 und 500 t. Die tatsächliche Verarbeitungsbreite kann geringer ausfallen, wenn bspw. die Kräfte zur Erreichung der Zieldichte nicht ausreichen oder die Walzenbiegung zu groß wird.

Um den hohen Qualitätsanforderungen gerecht zu werden, erfolgt eine kontinuierliche Dickenmessung mittels Laser sowie eine optische Fehlstellen- und Labelerkennung (Label aus Beschichtungsprozess). Der Fehlstellenerkennung nach der Kalandrierung kommt eine besondere Bedeutung zu, da sich einige Fehler erst im Anschluss an die Kalandrierung optisch erkennen lassen (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 3).

Das Grundproblem der Kalandrierung besteht darin, dass eine lineare Druckbelastung (Linienlast) auf einem Teilquerschnitt (beschichteter Teil) der Elektrode in der Überlagerung mit einer Zugbelastung (Bahnzugkraft) wirkt. Die nur partiell wirkende Linienlast führt zu einer unterschiedlichen Deformationsrate der Kollektorfolie, welche sich im Übergangsbereich zwischen Beschichtung (hohe Deformation) und Folie (keine Deformation) in Form von Faltenbildung (auch als „wrinkles“ bezeichnet) niederschlägt. Durch die Überlagerung mit dem wirkenden Bahnzug verlaufen die Falten nicht mehr orthogonal zur Beschichtung, sondern erhalten eine Richtung. Infolgedessen treten eine Reihe ungewünschter Effekte bzw. Defekte auf, welche die Weiterverarbeitung der Elektrode – insbesondere bei der Vereinzelung und Stapelbildung – negativ beeinflussen. (Kitaijma & Motoi et al. 2017)

Laut Günther & Schreiner et al. lassen sich die Defekte in geometrische, mechanische und strukturelle Defekte unterteilen (2020, S. 2). Da die geometrischen Defekte besondere Auswirkungen auf die Vereinzelung und Stapelbildung haben, werden nachfolgend nur diese genauer erläutert:

- Die **Elektrodenwelligkeit** hat ihren Ursprung in der plastischen Verformung des Stromsammlers durch die hohe Linienlast und die fehlende Möglichkeit zur Spannungsentlastung, weshalb dieser Effekt auch verstärkt bei kontinuierlich beschichteten Elektrodenbahnen auftritt. Die Amplituden liegen im Millimeter-, die Wellenlängen im Zentimeterbereich. (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 2)
- **Wrinkles** beschreiben gerichtete Wellen im Übergangsbereich unterschiedlicher Deformationsraten. Diese haben ihren Ursprung in der hohen Linienlast, welche zu einer lateralen Verschiebung der Beschichtung und, aufgrund der Adhäsion zwischen Beschichtung und Stromsammler, zu einer plastischen Deformation

des Stromsammlers führen. Da die Linienlast nur im Bereich der Beschichtung und nicht im unbeschichteten Bereich wirkt, ergeben sich unterschiedliche Deformationsraten, welche sich als „wrinkles“ mit Amplituden und Wellenlängen im Millimeterbereich ausdrücken. (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 2)

Zur Reduktion der beschriebenen Effekte kann eine Heißkalandrierung und ggf. der Einsatz von Distanzhülsen erfolgen. Die Heißkalandrierung wird meist über eine Walzentemperaturung umgesetzt und kann die Linienlast und damit die Deformationsrate herabsetzen, was letztlich zu einer Reduzierung der beschriebenen Defekte führt (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293). Die Distanzhülsen werden auf die Umlenkwalzen nach und ggf. auch vor dem Walzwerk aufgebracht, um so den Walzenumfang im unbeschichteten Bereich zu vergrößern. Sie werden primär eingesetzt, um ein Rucken der Folie im Randbereich zu induzieren (Kitajima & Motoi et al. 2017).

2.4.2.4 Längsschneiden (Slitting)

Das Längsschneiden, wie in Abbildung 2-17 dargestellt, erfolgt meist im Anschluss an die Kalandrierung und vor dem Vakuum-Trocknen, kann hingegen auch vor der Kalandrierung erfolgen oder gänzlich entfallen (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 293). Abhängig ist dies von dem Produktdesign und der dafür optimalen Prozessführung.

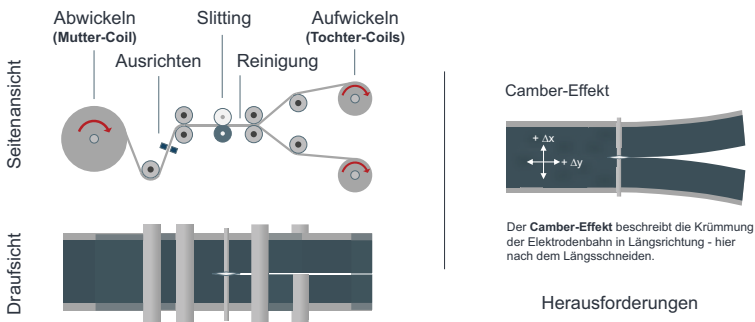


Abbildung 2-17: Exemplarische Darstellung der Prozessführung beim Längsschneiden und etwaig auftretende Effekte

Insbesondere bei gestreiften Beschichtungen müssen sowohl beschichtete als auch nicht beschichtete Bereiche optimal geschnitten werden. Deshalb ist in technisch aufwendigen Anlagen, neben einer präzisen Bahnkorrektur, ein unabhängiges Schneiden von reiner Kollektorfolie und beschichteter Folie möglich. Hierzu sind adaptive und individuelle Einstellmöglichkeiten (Voreilung, Schrängung, Überdeckung, Vorspannung

etc.) für jedes Messer vorgesehen. Zur Vermeidung statischer Aufladung und zur Partikelreinigung werden Ionenwinde genutzt. Zum Abführen von Schnittresten werden Absaugungen eingesetzt. Die kontaminierte Abluft wird vor Abgabe an die Produktionsumgebung gefiltert, um eine Partikelkontamination zu vermeiden.

Während des Prozesses erfolgen eine kontinuierliche Schnittkantenüberwachung sowie eine Fehlstellen- und Label-Erkennung mittels optischer Messtechnik. Die Schnittkantenüberwachung ist insbesondere deshalb notwendig, da die Schnittkante aus dem Slitting-Prozess i.d.R. bereits eine der finalen Kanten der Elektrode im Zellverbund darstellt – vgl. Kapitel 2.2.2.

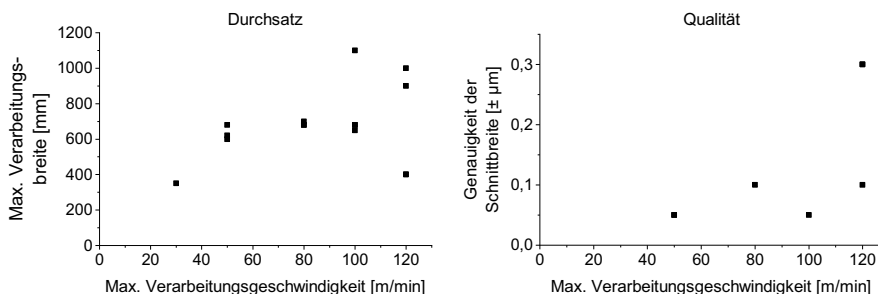


Abbildung 2-18: Zusammenhang zwischen Verarbeitungsbreite und -geschwindigkeit sowie Schneidgenauigkeit beim Längsschneiden

Partikelentstehung spielt eine wichtige Rolle und tritt beim Längsschneiden erstmals verstärkt auf. Die durch den Schneidprozess entstehenden Partikel sind dabei teilweise so klein, dass sie über die Luft in der Produktionsumgebung verteilt werden (Blomgren 2017, S. 5021). Die Partikel haben ihren Ursprung größtenteils im Schneidgut selbst, entstehen allerdings auch durch Abrieb des Schneidwerkzeugs (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 9). Aufgrund der Gefahr interner Kurzschlüsse und chem. Nebenreaktionen müssen diese möglichst vollständig von den Elektroden entfernt werden.

Das Längsschneiden kann, insbesondere im Anschluss an die Kalandrierung, zum sog. Camber-Effekt (auch Saber-Effekt) führen. Dieser beschreibt die Krümmung der Materialbahn in Längsrichtung, nach Durchtrennen der Bahn im beschichteten Bereich, hin zum unbeschichteten Randbereich. Die Krümmung entsteht aufgrund der im vorherigen Kapitel beschriebenen plastischen Verformung der Materialbahn im beschichteten Bereich. (Günther & Schreiner et al. 2020, S. 2–3)

Das Längsschneiden zählt zu den Hochdurchsatzverfahren und erfolgt meist bei Geschwindigkeiten von 50 bis 120 m/min, vgl. Abbildung 2-18. Die Genauigkeit der Schnittbreite wird von den Herstellern im Bereich zwischen $\pm 0,05$ und $\pm 0,3$ mm angegeben, wobei Materialinhomogenitäten diesen Wert stets nach oben korrigieren, so dass das untere Limit eher in der Größenordnung um $\pm 0,15$ mm liegen dürfte, wie in Heimes & Kampker et al. (2018, S. 9) berichtet.

Der Schnitt erfolgt durch Hartstahl- oder keramische Rundmesser oder durch eine Kombination von beiden. Keramische Messer haben den Vorteil, dass deren Abrieb durch den Schneidprozess selbst nichtleitend ist und keine zellinternen Kurzschlüsse provoziert werden (Kaiser & Wenzel et al. 2014, S. 9). Alternativ zum Rundmesser können auch Laser oder Klingen eingesetzt werden (Heimes & Kampker et al. 2018, S. 9).

2.4.2.5 Zusammenfassung getakteter Prozesse

Im Anschluss an das Längsschneiden geht die **Produktion** typischerweise **von einer kontinuierlichen in eine diskontinuierliche Prozessführung über**. Der maximale Output der Zellfabrik wird nun nicht mehr über die maximal zu verarbeitende Bahnbreite und Bahngeschwindigkeit, sondern durch den Anlagentakt und das Zellformat bestimmt (Fleischer & Weinmann et al. 2021, S. 10–13).

Abschließend für Kapitel 2.4.2 erfolgt eine Übersicht über die Durchsatzangaben einiger ausgewählter Prozessschritte für den diskontinuierlichen Teil der Fertigung. Die Anzahl der ausgewerteten Anlagen pro Prozessschritt ist der Klammer zu entnehmen. Der Takt der Anlagen liegt mehrheitlich im Bereich zwischen 10 und 25 ppm (aus dem engl. „parts per minute“). Besonders zeitaufwendig stellen sich dabei das Tiefziehen der Pouchfolie (Halbschalen) sowie das Befüllen und Siegeln dar, vgl. Abbildung 2-19.

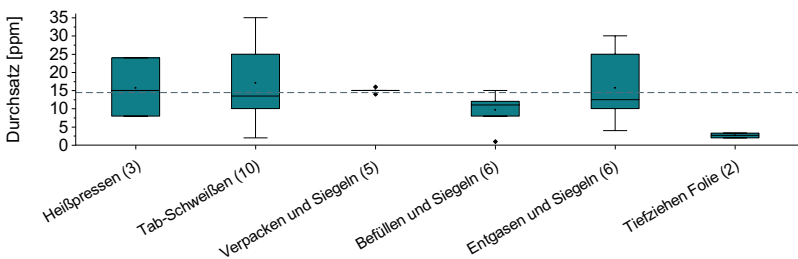


Abbildung 2-19: Kumulierte Auswertung des Durchsatzes ausgewählter Prozessschritte im diskontinuierlichen Prozessteil

2.4.3 Linienplanung und Einzelanlagenverkettung

Die Logistik innerhalb der Zellproduktionslinien stellt einen beträchtlichen Aufwand dar. Der Grund hierfür ist die hohe Anzahl an Einzelanlagen, die hinsichtlich ihrer Kapazität aufeinander abgestimmt und miteinander verkettet werden müssen.

2.4.3.1 Linienplanung

Die Fertigungskapazitäten der Anlagen innerhalb der Batterieproduktion sind stark heterogen. Sie reichen von unter hundert bis zu mehreren tausend Zelläquivalenten (benötigtes Material pro Zelle) pro Stunde (Fleischer & Weinmann et al. 2021, S. 7). Die Kapazität der Produktionslinie lässt sich in einer optimalen Auslegung folglich nicht beliebig, sondern immer nur um das Vielfache der durchsatzstärksten Anlage skalieren. Da die Auslegung der Linie auf ein bestimmtes Format hin erfolgt, führen nachträgliche Änderungen am Prozess oder Format im Allgemeinen zu Über- oder Unterkapazitäten und folglich steigenden Produktionskosten (Fleischer & Weinmann et al. 2021, S. 13).

2.4.3.2 Einzelanlagenverkettung

Wie zu Beginn des Kapitels 2.4 erläutert, besteht die Zellfertigung aus kontinuierlich und diskontinuierlich geführten Prozessen (Fleischer & Weinmann et al. 2021, S. 12).

Im **kontinuierlichen** Teil besteht die logistische Herausforderung im Wesentlichen in der Handhabung und in dem Transport von Folien und Elektroden-Coils zwischen den Lagern und Anlagen sowie in der Dosierung und Förderung von Pulvern und Flüssigkeiten. Die Coils werden i.d.R. automatisiert mittels AGVs (Automated Guided Vehicles), Pulver und Flüssigkeiten über Förderanlagen und Tanksysteme transportiert - vgl. Kapitel 2.4.2.1.

Im **diskontinuierlichen** Prozessteil steigt die Komplexität der Logistik stark an, da die Coils in kleinere Einheiten (z.B. Elektrodeneinzelblätter) unterteilt und zusammen mit den weiteren Bestandteilen (z.B. Ableiterbleche) zu einer Zelle assembliert werden. Mit der Anzahl der zu handhabenden Teile steigt wiederum der zeitliche Aufwand und dadurch die Anlagenanzahl stark an. Mit fortschreitendem Assemblierungszustand entspannt sich die Situation, da sich die Anzahl der zu handhabenden Einzelkomponenten verringert. Die Weitergabe innerhalb der Anlagen erfolgt bspw. über Rundtische oder Lineartransportsysteme. Der Weitertransport zwischen den Stationen erfolgt meist über Magazine und Warenträger, welche z.B. über Förderbänder miteinander verkettet werden.

2.5 Industrielle Vereinzelungs- und Stapelmaschinen

In diesem Kapitel erfolgt eine detaillierte Betrachtung des Vereinzelungs- und Stapelprozesses. Da mit dem Abschluss dieser beiden Prozesse bereits rund 80 % der Herstellungskosten angefallen sind (Kwade & Haselrieder et al. 2018, S. 295) und die Fehleranfälligkeit aufgrund der hohen Anzahl an Einzeloperationen als besonders hoch eingestuft wird (Jung & Park et al. 2018), spielen Prozessstabilität, Prozessqualität und eine engmaschige Qualitätskontrolle hier eine wesentliche Rolle.

2.5.1 Vereinzelungsmaschinen

Vereinzelungsmaschinen (sog. „Singulation-Machines“ oder „Electrode-Making-Machines“) führen meist zwei in eine Maschine integrierte Prozessschritte durch – „Notching“ und „Ablängen“. Die Aufgabe der Anlage besteht darin, Einzelblattelektroden aus der Elektrodenbahn herauszutrennen und sie in magazinierte Form dem Folgeprozess bereitzustellen. Alternativ kann der Prozess auch auf zwei Maschinen aufgeteilt werden, wobei die Ableiterföhnchen zuerst in einem Rolle-zu-Rolle Prozess ausgeformt werden und anschließend eine Vereinzelung, ggf. in Kombination mit dem Stapelprozess, erfolgt. Unabhängig von der konkreten Prozessführung gilt, dass die Herstellung der Elektrodenblätter in Serienfertigungen weitestgehend schnittfrei erfolgen muss, um keinen teuren Sondermüll zu produzieren, der anschließend entsorgt werden muss. Nachfolgend soll der Prozess anhand einer Beispielanlage erläutert werden.

2.5.1.1 Prozessführung in der Vereinzelung

Das Elektrodenband wird, meist im Anschluss an das Längsschneiden und Vakuumtrocknen, dem Vereinzelungsprozess zugeführt. Wie in Abbildung 2-20 skizziert, wird das Elektrodenband abgewickelt und seine Bahnkante präzise zum anschließenden Ableiterformen (sog. „Notching“) mittels Drehrahmen ausgerichtet. Die im Deutschen übliche Bezeichnung „Ableiterformen“ ist nur bedingt zur Beschreibung des Vorgangs geeignet, da die Formänderung oft auch das Einbringen einer beidseitigen Dreiecksnut (entspricht Cut-Angle am Elektrodenblatt) beinhaltet, siehe Abbildung 2-20 rechts (Ryu & Kwon et al. 2018). Das Notching beschreibt folglich den Prozess, bei dem aus einem beschichteten Stromableiter (Aluminium oder Kupferfolie) einzelne Ableiterföhnchen sowie eine Dreiecksnut ausgeformt werden. Bei durchgehenden Beschichtungen liegen die Ableiterföhnchen seitlich, bei intermittierenden Beschichtungen zumeist innerhalb des Elektrodenbandes. Unabhängig von der Position wird der Prozess üblicherweise

durch einen Laser oder eine Stanze umgesetzt (Ryu & Kwon et al. 2018). Welche der beiden Technologien verwendet wird, hängt letztlich vom Investitionsaufwand, der Amortisationszeit, der Lebensdauer des Werkzeugs sowie von funktionalen Aspekten ab (Pfleger 2017, S. 550). Da das Elektrodenband i.d.R. seitlich beschnitten wird, kann dieses anschließend in zusammenhängendem Zustand aus dem Arbeitsbereich des Werkzeugs herausgefördert werden (siehe Abbildung 2-20).

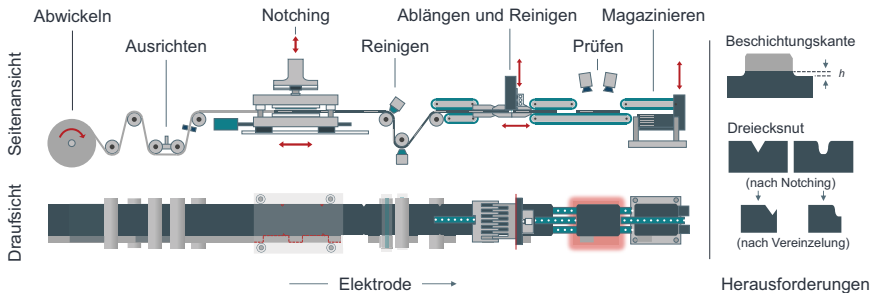


Abbildung 2-20: Schematische Darstellung der Vereinzelung mittels Stanzwerkzeug sowie auftretender Herausforderungen (in Anlehnung an (Ryu & Kwon et al. 2018; Ōsawa & Yūichirō et al. 2013))

Nach dem Notching erfolgt das Ablängen durch ein Schneidwerkzeug in der Mitte der Dreiecksnut. Abschließend erfolgen ein weiterer Reinigungsschritt, eine Qualitätskontrolle sowie ein Speichern der Elektroden in Magazinen oder deren direkte Weitergabe.

Notching mittels Laser

Das Laser-Notching wird im Allgemeinen als flexibles Verfahren beschrieben (Kronthaler & Schloegl et al. 2012, S. 215; Pfeleger 2017, S. 549), welches verschiedene Elektrodenformate ohne zusätzlich anfallende Kosten herstellen kann (Liu & Zhang et al. 2021, S. 8). Dies gilt allerdings oft nur eingeschränkt für die Herstellung von Ableiterföhnchen und Dreiecksnut, da für eine vollständige Vereinzelung – auch mittels Laser – diverse formatabhängige Greifer und Absaugvorrichtungen verwendet werden (Pfleger 2017, S. 554–555).

Die Schnittgeschwindigkeit beim Laserschneiden ist materialabhängig und hängt u.a. vom Wärmeabsorptionskoeffizienten der Materialien, von den Schichtdicken sowie vom Kalandriergrad ab (Kronthaler & Schloegl et al. 2012, S. 223; Luetke & Franke et al. 2011, S. 289; Lee & Oh et al. 2019, S. 11–14). Laut Baumann & Lasagni et al. (2019, S. 4) sind derzeit maximal etwa 600 m/min für die Anode und 240 m/min für die Kathode

möglich. Ein exaktes Einstellen der Parameter ist beim Laserschneiden unerlässlich, um den Wärmeeintrag und etwaige lokale Schädigungen im Randbereich zu begrenzen (Kriegler & Binzer et al. 2020, S. 3) sowie die Stufenbildung an der Schnittkante (sog. „clearance width“) durch die unterschiedlichen Abtragungsraten zu minimieren (Pfleger 2017, S. 555). Die Parameterwahl ist darüber hinaus wichtig um die Kontamination durch z.B. Schmelzmetallspritzer zu reduzieren, welche zu den größten Risiken des Laserschneidprozesses zählen (Liu & Zhang et al. 2021, S. 8).

Es bleibt festzuhalten, dass das Laserschneiden zwar im Hinblick auf die Geometrie und Position von Ableiterfährnchen und Dreiecksnut flexibel ist, es aber einer exakten Anpassung der Prozessparameter an die jeweiligen Materialien bedarf.

Notching mittels Stanze

Die Flexibilität beim Notching mittels Stanze ist aufgrund des Einsatzes unveränderlicher Werkzeuge im Gegensatz zum Laserprozess beschränkt, vgl. Kapitel. 4.1.3. Einige Anlagen bieten Freiheitsgrade durch den Einsatz vierteiliger Werkzeuge, welche die Verarbeitung unterschiedlicher Bahnbreiten ermöglichen.

Die Stanzgeschwindigkeiten sind in einem Aufbau, wie in Abbildung 2-21 dargestellt, auf etwa 200 ppm limitiert. Dies liegt an der Masse des Stanzwerkzeugs von etwa 70 kg und an der zu überwindenden Trägheitskraft bei dessen Beschleunigung und Verzögerung zur Synchronisation mit der kontinuierlich laufenden Materialbahn. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Elektrodengröße, Werkzeuggröße und Werkzeuggewicht ist der maximal erreichbare Takt zudem formatabhängig. (Kim & Go 2013a)

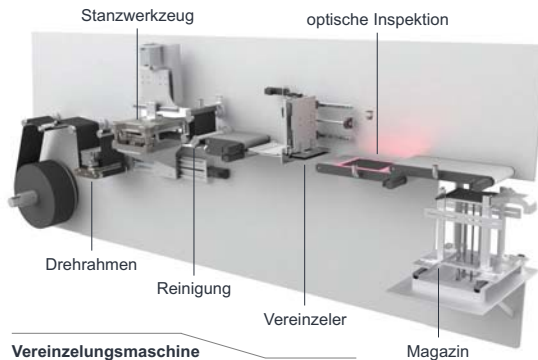


Abbildung 2-21: Exemplarische Darstellung einer Vereinzelmachine

Eine Möglichkeit den Takt weiter zu erhöhen, besteht in der Beschleunigung und Verzögerung der Elektrodenbahn selbst, deren Masse deutlich geringer ist als die des Werkzeugs. Dies kann über Hochgeschwindigkeits-Zugwerke oder exzentrische Umlenkwalzen vor und nach der Notching-Einheit erfolgen. (Kim & Go 2013a)

Wie auch das Laserschneiden verursacht das Stanzen Partikel durch abgeplatzt Material an den Schnittkanten (Fröhlich & Leithoff et al. 2018, S. 342). Da es beim Stanzen außerdem zu einer Zerkleinerung der Aktivmaterialpartikel kommt (Lee & Oh et al. 2019, S. 13), entstehen – wie beim Lasern auch – feine Stäube, die sich über die Luft in der Produktionsumgebung verteilen können (Blomgren 2017, S. 5021). Die Partikelentstehung und insbesondere Schnittkantenqualitäten hängen beim Stanzen maßgeblich vom Werkzeugzustand ab, sodass es – im Gegensatz zum Laserschneiden – zu schwankenden Prozessqualitäten kommt (Jansen & Kandula et al. 2020, S. 2). Insbesondere die Kathodenmaterialien verursachen einen hohen Verschleiß an der Werkzeugschneide und dadurch hohe Instandhaltungskosten (Jansen & Kandula et al. 2020, S. 2; Kronthaler & Schloegl et al. 2012, S. 215).

Vergleich der Technologien

Die nachfolgende Abbildung 2-22 stellt den Zusammenhang zwischen der maximalen Verarbeitungsgeschwindigkeit und der Verarbeitungsbereite dar. Von den insgesamt 20 Anlagen konnten in dieser Form nur sechs dargestellt werden, da nicht immer beide Werte von den Herstellern angegeben werden.

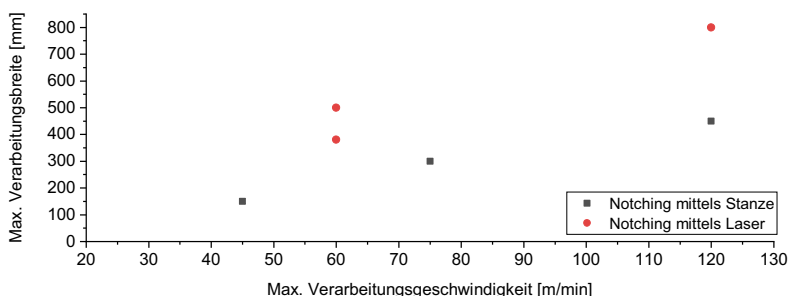


Abbildung 2-22: Max. Verarbeitungsbreite und -geschwindigkeiten von Vereinzelungsmaschinen

Die Prozessgeschwindigkeiten beim Notching mittels Laser liegen für die meisten Hersteller zwischen 60 und 70 m/min, beim Stanzen zwischen 120 und 240 ppm. Für eine

bessere Vergleichbarkeit der Prozesse wurde für den Stanzprozess das Bahngeschwindigkeitsäquivalent aus Takt und max. Elektrodenlänge berechnet. Die Verarbeitungsbreiten sind beim Notching mittels Laser erwartungsgemäß höher, da die Bahnbreite für den Prozess eine untergeordnete Rolle spielt. Die Schnittbreitengenauigkeiten werden technologieunabhängig mit $\pm 0,2$ bis $\pm 0,3$ mm angegeben.

Ablängen

Im Anschluss an das Notching erfolgt ein Ablängen der Elektrodenbahn in der Mitte der Kernnut, um ein Elektrodeneinzelblatt zu erzeugen. Der Schnitt erfolgt meist mittels zweier Langmesser, die einen Scherschnitt ausführen. Eine exakte Schnittposition nach dem Notching ist insbesondere deshalb wichtig, weil es sonst zu abstehenden Graten kommen kann, welche eine potenzielle Gefahr für die Sicherheit der Zelle darstellen, vgl. Abbildung 2-20 rechts unten (Ryu & Kwon et al. 2018). Da das Ablängen in derselben Maschine wie das Notching erfolgt, gelten folglich analoge Prozessgeschwindigkeiten. Die Schnittlängengenauigkeit in Bahnlaufrichtung wird herstellerseitig mit $\pm 0,2$ bis $\pm 0,3$ mm angegeben.

Zur Qualitätssicherung im Vereinzelungsprozess erfolgt meist eine optische Schnittkanten- und Oberflächenüberwachung sowie eine Tab-Mittenabstands- und Maßhaltigkeitserfassung. Darüber hinaus sind die Anlagen mit einer Label- und Fehlstellenerkennung ausgestattet.

2.5.1.2 Komponenten in Vereinzelungsmaschinen

Im Folgenden soll nochmals detaillierter auf die Komponenten in Vereinzelungsmaschinen sowie deren Funktionen und etwaige Herausforderungen eingegangen werden.

Stanz- und Vereinzelungswerkzeug

Wie beschrieben, wird das Ableiterfähnchen bspw. mittels **Stanzwerkzeug** ausgeformt. Dabei spielt die Ausrichtung der Bahnkante eine zentrale Rolle, denn Sie legt die Position der Beschichtungskante auf dem Ableiterfähnchen fest. Der eingangs beschriebene Camber-Effekt führt dazu, dass die Ausrichtung über herkömmliche Drehrahmensysteme aufgrund von ungleichmäßiger Druckverteilung und auftretendem Mäandern, zu Qualitätsproblemen in der Produktion führen kann (Kim & Go et al. 2021). Aus diesem Grund verwenden einige Hersteller spezielle Systeme zur Harmonisierung der Bahnspannung, welche insgesamt auch für eine bessere Kontrollierbarkeit der Materialbahn sorgen (Kim & Go et al. 2021).

Das Werkzeug führt einen unterbrochenen Trennschnitt aus, wodurch die Kante des Stromkollektors in Bahnlaufrichtung unversehrt bleibt, um den Stanzgitterrest kontinuierlich durch die untere Werkzeughälfte abführen zu können.

Wie bereits beschrieben, wird neben dem Ableiterföhnchen meist auch eine Kerbnut in das Elektrodenband eingebracht. Diese ist bei vielen Herstellern als Parabel mit Plateau ausgeführt, vgl. Abbildung 2-20, da sich so abstehende Grate durch Positionsabweichungen beim Vereinzeln vermeiden lassen. Darüber hinaus wirkt sich dieses Design positiv auf die Standzeit des Werkzeugs aus und reduziert die Wahrscheinlichkeit für Bahnrisse durch das Auftreten von Spannungsüberhöhungen (Ösawa & Yüichirō et al. 2013; Ryu & Kwon et al. 2018).



Stanzwerkzeug



Vereinzlungswerkzeug

Abbildung 2-23: Exemplarische Darstellung eines Werkzeugs zum Notching (links) und zum Vereinzeln (rechts)

Mit einem **Vereinzlungswerkzeug** wird das Elektrodenblatt anschließend aus der Elektrodenbahn herausgetrennt. Zur Erreichung einer hohen Zuschnittgenauigkeit ist es wichtig, den Schnitt mittig zur geformten Kerbnut zu setzen. Das Ableiterföhnchen eignet sich aufgrund potenzieller Deformationen (z.B. Einknickung) nicht zur Detektion, weshalb meist die Kerbnut herangezogen wird (Wi & Park et al. 2020). Diese Methode führt zur Erreichung höherer Maßhaltigkeit in Bezug auf die Elektrodenblattlänge.

Analog zum Notching ist die Schnittkantenqualität beim Vereinzeln von großer Bedeutung. Optimiert werden kann diese über die Vorspannung von Ober- und Untermesser, wobei eine zu große Vorspannung zu hohem Verschleiß und eine zu geringe Vorspannung, aufgrund der wirkenden Schneidkraft, zu einer Öffnung des Schneidspaltes während des Schneidvorgangs führen kann (Kim & Go 2014b). Die Klinge und Aufnahme sind deshalb so zu gestalten, dass die Deformation während des Schneidvorgangs minimal ist. Ebenfalls zur Schnittqualität beitragend ist der integrierte Greifmechanismus,

denn dieser sorgt für eine Fixierung und Stabilisierung der Elektrodenbahn während des Schneidvorgangs (Kim & Go 2013b; Götz 1991, S. 101).

Zur Reduktion von Stillstandszeiten spielt die Zeit zum Tausch und Einrichten der Stanz- und Schneidwerkzeuge eine bedeutende Rolle, denn diese kann mehrere Stunden in Anspruch nehmen (Kim & Go 2013b). Bei einer üblichen Standzeit von 1. Mio. Hüben und einem Anlagen-Takt von 200 ppm ergibt sich ein Wechsel-Intervall von 3,5 Tagen. Ein zweistündiges Wartungsintervall bspw. entspricht, unter den obigen Annahmen, einem wöchentlichen Produktionsausfall von 48.000 Elektrodenblättern.

Reinigungs- und Kamerasystem

Im Anschluss an das Ableiterformen und Ablängen erfolgen diverse Reinigungsschritte, hier nicht illustriert, zur Entfernung von Aluminium-, Kupfer- und Aktivmaterialpartikeln von den Oberflächen der Elektroden. Die Reinigung der Elektrodenflächen erfolgt in einer Kombination aus Abbürsten und Absaugen, wobei ein Verweilen der rotierenden Werkzeuge auf der Elektrode stets zu vermeiden ist, um Materialabtrag und thermischen Verschluss zu vermeiden. (Kim & Go 2014a)

Im Anschluss daran folgt eine Qualitätskontrolle aller Einzelelektroden, vgl. Abbildung 2-24. Aufgrund der eingangs beschriebenen Schwierigkeiten in Bezug auf die Bahnkantenregelung kommt es zu nicht vermeidbaren Ausrichtungsfehlern (Kim & Go et al. 2021; Kim & Kwon 2013). Zur Reduzierung von Ausschüssen wird die Beschichtungskante deshalb stets so eingeregelt, dass sie im Bereich des Ableiterfährnchens liegt – charakterisiert über eine Höhe h , vgl. Abbildung 2-20. Diese Höhe wird über eine Kamera geprüft und ist üblicherweise kleiner als ein Millimeter (Kim & Kwon 2013).

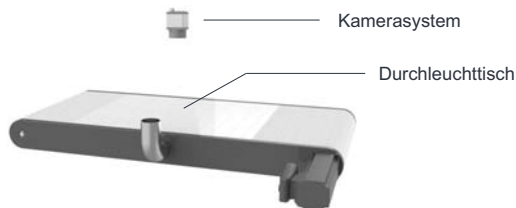


Abbildung 2-24: Exemplarische Darstellung eines Durchleuchtungstisches zur optischen Qualitätskontrolle

Neben der Inspektion der Beschichtungskante kann auch eine Begutachtung der seitlichen Schnittkanten erfolgen. Beim Stanzvorgang kann es zu einem „Verschmieren“ der

Aktivmaterial- und Metallschicht kommen (Luetke & Franke et al. 2011, S. 289). Diese kann zu der Verdeckung von Graten und Problemen (nicht Entdeckung) bei der Qualitätssicherung führen (Matsumura & Murata et al. 2013). Die Erkennung auch von verdeckten Schneidgraten ist jedoch wichtig, da diese den Separator durchdringen können und es so zu einer elektrischen Kontaktierung der Elektroden (Kurzschluss) kommen kann (Matsumura & Murata et al. 2013). Darüber hinaus erfolgt eine optische Überwachung der „clearance width“ sowie der Elektrodenoberfläche auf Partikelrückstände (Fröhlich & Leithoff et al. 2018, S. 342–343; Ōsawa & Yūichirō et al. 2013).

Magazin-Typen

Die Magazine werden vorrangig zum Transport der Elektrodeneinzellagen zwischen den Anlagen verwendet. Diese können verstellbar und nicht verstellbar ausgeführt sein, vgl. Abbildung 2-25. Für den Fall, dass die Vakuumtrocknung nach der Vereinzelung erfolgt, dienen sie auch als Warenträger für den Trocknungsvorgang. Zur Maximierung der Trockner-Kapazitäten müssen die Magazine dann möglichst kompakt ausgeführt sein (Kim & Noh et al. 2020). Eine Verstellmöglichkeit nimmt zusätzlichen Bauraum in Anspruch und konterkariert die Anforderungen hoher Effizienz.



nicht verstellbares Magazin



verstellbares Magazin

Abbildung 2-25: Exemplarische Darstellung eines nicht verstellbaren (links) und eines verstellbaren Magazins (rechts) (in Anlehnung an (Kim & Noh et al. 2020))

Bei der Beladung der Magazine ist der Kontakt zwischen Elektrode und Magazin in Form von Impuls oder Relativbewegung zu vermeiden, um Aktivmaterialbrüche oder Abplatzungen zu verhindern. Hierfür gibt es spezielle Systeme zur kontrollierten Führung der Elektroden in die Magazine sowie Systeme zur Ausrichtung der Elektrodenblätter in das Magazin selbst (Kim & Geh et al. 2013). Ein Positionieren der Elektrodenblätter über die seitlichen Begrenzungen ist auch aufgrund der geringen Biegesteifigkeit des Materials nicht ratsam und kann zu einem Abknicken der Elektrodenblätter im

Randbereich und Folgefehlern beim Abstapeln führen (Kim & Geh et al. 2018). Im Idealfall ruht der Elektrodenstapel deshalb freistehend auf der Bodenplatte und berührt die seitlichen Begrenzungen nicht. Freistehende Stapel sind zudem notwendig, wenn die Greiferfläche der Elektrodengröße entspricht oder größer ist (Götz 1991, S. 177).

Da die Beladung der Magazine im Takt der Vereinzelmaschine erfolgen muss und ein Magazinwechsel etwa 30 Sekunden bis zwei Minuten in Anspruch nimmt, werden zur Vermeidung von Leerlaufzeiten i.d.R. mehrere Magazine simultan bestückt. Der Magazinwechsel erfolgt kontinuierlich und parallel zur Bestückung. Bei einem Takt von 180 Blättern pro Minute, dauert die Beladung eines Magazins circa 8 Minuten. (Kim & Geh et al. 2016)

2.5.2 Stapelmaschinen

In diesem Kapitel soll der Stand der Technik von Stapelmaschinen genauer beleuchtet werden. Dazu gehören eine Erläuterung der Genauigkeitsangaben der Hersteller, eine Beschreibung der Prozessführung und Herstellerangaben sowie eine Vorstellung aller zentralen Komponenten.

2.5.2.1 Genauigkeitsangaben der Maschinenhersteller

Bei der Stapelbildung ist die Positionierung der Elektroden zueinander wichtig, da eine Fehlansrichtung eine Verschlechterung von Leistung und Lebensdauer bedingt (Kim & Hisajima 2014, S. 1). Die Anlagenhersteller verwenden unterschiedliche Kennzahlen und Bezeichnungen zur Angabe der Genauigkeiten, was einen Vergleich der Maschinen untereinander erschwert. Grundsätzlich können sich die Angaben zur Stapelgenauigkeit wie folgt unterscheiden:

1. Es kann eine Bewertung auf Basis der **Einzelkomponenten**, z.B. Kathodeneinzelblatt zu Kathodeneinzelblatt, oder auf Basis des **Zellverbundes**, z.B. Kathodeneinzelblatt zu Anodeneinzelblatt, erfolgen.
2. Es kann eine **angrenzende Genauigkeit** („adjacent accuracy“) oder eine **Gesamtgenauigkeit** („overall accuracy“) angegeben werden.
3. Es kann die **Endfläche** („end-phase“) oder der **Mittelpunkt** („center-point“) als Referenz für die Angabe herangezogen werden.

Die nachfolgende Abbildung 2-26 zeigt eine Übersicht der identifizierten Möglichkeiten an Herstellergenauigkeitsangaben und erläutert diese.

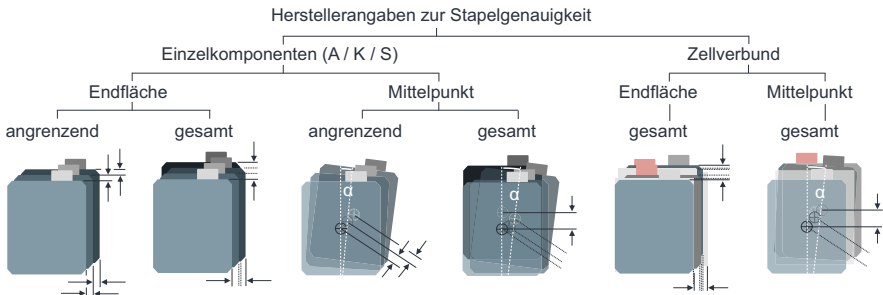


Abbildung 2-26: Übersicht über die Genauigkeitsangaben der Hersteller

Die am häufigsten verwendete und damit für den Vergleich der Maschinen am besten geeignete Angabe, ist die der Genauigkeiten der Einzelkomponenten (Anode-Anode, Kathode-Kathode, Separator-Separator) zueinander. Als Referenz dienen dabei entweder die Endflächen oder der Mittelpunkt des Einzelblattes. Welche der beiden Angaben vom Hersteller verwendet wird, hängt bspw. vom verwendeten Ausrichtsystem (optisch oder mechanisch) ab. Bei einem Vergleich der Endflächen ist zu beachten, dass die Genauigkeiten nicht symmetrisch und damit seitenabhängig sein können – abhängig von der Maßhaltigkeit der Elektrodenblätter und dem verwendeten Ausrichtsystem. Bei einem Vergleich der Blattmittelpunkte ist zu beachten, dass der Einfluss eines etwaigen Winkelfehlers nicht berücksichtigt ist.

In den meisten Fällen erfolgt eine Angabe sowohl für die angrenzende („adjacent“) als auch die gesamte („overall“) Genauigkeit. Die **angrenzende Genauigkeit** beschreibt die Positionsabweichung der Endflächen oder Mittelpunkte angrenzender Elektroden und stellt das Maximum aller gemessenen paarweisen Einzelabstände dar. Die **Gesamtgenauigkeit** hingegen beschreibt das globale Maximum unter Betrachtung aller gemessenen Positionen. Die angrenzende Genauigkeit ist eine wichtige Angabe im Hinblick auf die Funktionalität der Zelle, während die Gesamtgenauigkeit besser dazu geeignet ist, die Wiederholgenauigkeit der Gesamtanlage zu bewerten. Da es sich bei der „overall accuracy“ um ein globales und kein lokales Maximum handelt, ist sie immer größer gleich der „adjacent accuracy“.

Oftmals erfolgt die **Genauigkeitsangabe** auch in **Abhängigkeit der Elektroden-dimension**, wodurch für einen Anlagentyp oft zwei verschiedene Genauigkeiten angegeben werden. Elektrodenweiten kleiner als 300 mm werden dabei oft als „short cell“ oder „standard cell“, Elektrodenweiten größer als 300 mm oft als „long cell“ bezeichnet.

2.5.2.2 Prozessführung in der Stapelbildung

Die generellen Möglichkeiten der Verfahrensführung zur Herstellung von Zellverbänden wurden in Baumeister (2017, S. 22–28) und Bach (2017, S. 305–313) bereits beschrieben. Aufgrund des Trends zum Einsatz von Einzelblattelektroden, vgl. Kapitel 2.3.3.1, soll nachfolgend nur auf jene Anlagen eingegangen werden, welche die Elektroden als Einzelblätter verarbeiten. Grundsätzlich kommen dazu drei Anlagentypen in Frage:

Typ 1: Stapelmaschinen zur Herstellung von Sub-Zellverbänden (z.B. Bi-Zellen)

Typ 2: Stapelmaschinen zur Herstellung von Zellstapeln aus Sub-Zellverbänden

Typ 3: Stapelmaschinen zur Herstellung von Zellstapeln aus Einzelblattelektroden

Aufgrund der begrenzten Prozessgeschwindigkeit und Materialeinschränkung bei der Verwendung von Heißlaminatoren, sollen Stapelmaschinen des Typs 1 und 2 nachfolgend nicht näher betrachtet werden.

Wie eingangs beschrieben, wird der Separator in kommerziellen Stapelmaschinen nicht als Einzelblatt, sondern als kontinuierliche Bahn oder im Verbund verarbeitet. Begründet liegt dies in der geringen Biegesteifigkeit und den Problemen mit starker elektrostatischer Aufladung, welche eine prozesssichere Handhabung und Ausrichtung erschweren (Shirakawa & Yokota et al. 2010).

Auf Basis der obigen Argumentation werden im weiteren Verlauf der Arbeit nur jene Verfahren betrachtet, die die Kriterien in Bezug auf die Separatorführung erfüllen und dem Maschinentyp 3 entsprechen. Aufgrund dessen, dass das Z-Falten einen populären Vertreter dieser Kategorie darstellt (Heimes & Kampker et al. 2018, S. 15), soll es nachfolgend genauer erläutert werden. In diesem Zusammenhang erfolgt außerdem eine detaillierte Betrachtung der Einzelkomponenten (Greifer, Achsen, Ausrichtstation etc.), welche jedoch auch in anderen Maschinentypen eingesetzt werden.

Grundsätzlich kann bei den Verfahren zur Herstellung einer Z-Faltung eine Unterteilung danach erfolgen, ob die **Stapelstation bewegt** oder **statisch** ausgeführt ist. Innerhalb dieser beiden Gruppen kann wiederum zwischen den Bewegungsarten **geradlinige** und **nicht geradlinige Bewegung** differenziert werden.

Nachfolgend soll exemplarisch auf den Verfahrensablauf mit **bewegter Stapelstation** und **geradliniger Bewegung** eingegangen werden. Wie in Abbildung 2-27 veranschaulicht, werden die Elektrodeneinzelblätter üblicherweise mittels Sauggreifer den Magazinen entnommen und über ein Portal zur Ausrichtstation transportiert. Dort werden die

Lage sowie weitere Merkmale der Elektrodenblätter erfasst und es erfolgt eine Korrektur von Position und Orientierung. Anschließend werden die Elektrodenblätter von einem Flächengreifer aufgenommen und auf der Stapelstation platziert, welche zwischen den beiden Abholpositionen traversiert. Die Separatorbahn wird zwischen zwei Führungswalzen hindurch zur Stapelstation geführt. An der jeweiligen Abholposition werden die Anoden- bzw. Kathodeneinzelblätter zusammen mit dem Separator durch zwei Klemmfingerpaare fixiert. Das Nachfördern der Separatorbahn erfolgt über die Bewegung der Stapelstation.

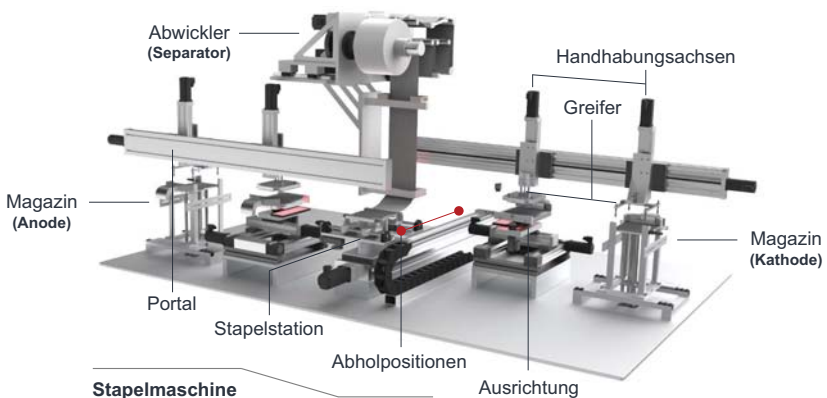


Abbildung 2-27: Exemplarische Darstellung einer Stapelmaschine

Bei der Entnahme des Stapels aus der Stapelvorrichtung ist der kontinuierliche Separator meist noch mit diesem verbunden. Der Separator wird i.d.R. nachgefördert, um genug Material für das anschließende Umwickeln (sog. „wrapping“) des Stapels zur Verfügung zu haben. Sobald der Vorgang des Nachförderns abgeschlossen ist, wird der Separator meist über ein Vakuum an der Stapelstation fixiert (Kim 2017) und unmittelbar dahinter durchtrennt. Das Bahndende auf Seiten des Zellstapels wird anschließend mittels Klebestreifen fixiert (sog. „taping“), vgl. Kapitel 2.3.1, und es können zur Qualitätssicherung Bar- oder QR-Codes am Stapel angebracht werden (Rothermel & Winter et al. 2018, S. 18; Riexinger & Doppler et al. 2020, S. 126).

Laut Kwade & Haselrieder et al. (2018, S. 294) spielt die Stapelbildung mit Einzelblattelektroden, insbesondere im Automobilbereich, eine wichtige Rolle. Das Problem hierbei sind jedoch die hohen Prozesszeiten im Vergleich zu anderen, bspw. wickelnden Verfahren (Duffner & Mauler et al. 2021, S. 12). Eine wichtige Prozesskenngröße ist

deshalb die **Stapelgeschwindigkeit**. Bei der Herstellerangabe ist darauf zu achten, ob es sich um eine Maschine mit einer oder mehreren simultan arbeitenden Stapelstationen („multi-location“) handelt. Bezogen auf eine Stapelstation können gegenwärtig Taktzeiten von max. 2 Blättern pro Sekunde erreicht werden. Der Großteil kommerziell verfügbarer Stapelmaschinen liegt allerdings im Bereich zwischen 0,6 bis 1,5 Blatt pro Sekunde (single-location), vgl. Abbildung 2-28. Die Angabe deckt sich mit dem in Heims & Kampker et al. (2018, S. 2) angegebenen Wert von 1 Blatt pro Sekunde.

Die **Stapelgenauigkeiten**, hier angegeben ist die Genauigkeit angrenzender Elektroden-Endflächen (Anode oder Kathode), bewegen sich im Bereich zwischen $\pm 0,15$ bis $\pm 0,3$ mm, in einigen Fällen auch darüber. Auch dieser Bereich deckt sich mit der Angabe in Heims & Kampker et al. (2018, S. 2) von $\pm 0,2$ bis $\pm 0,3$ mm.

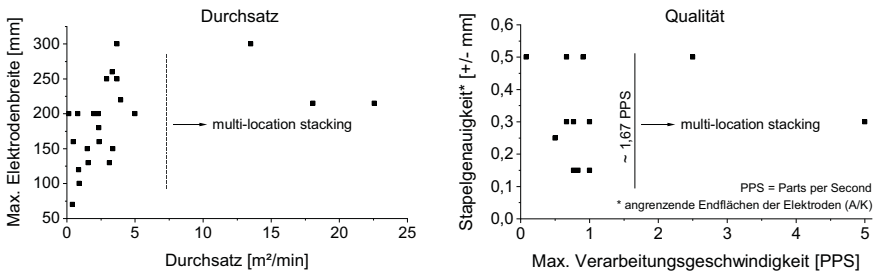


Abbildung 2-28: Zusammenhang zwischen Verarbeitungsgeschwindigkeit und dem Durchsatz bzw. der Prozessqualität von Stapelbildungsmaschinen

Die Angabe zum Durchsatz errechnet sich aus der max. zu verarbeitenden Elektrodengröße und Verarbeitungsgeschwindigkeit.

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass sowohl die Stapelgeschwindigkeit als auch die Stapelgenauigkeit stark von den verwendeten Technologien in der Anlage abhängen. Die **Stapelgenauigkeit** ist zudem **in einem sehr hohen Maß von den Prozessschritten Längsschneiden und Vereinzeln abhängig**, da dort der Zuschnitt des Elektrodenblattes erfolgt. Die Genauigkeit des Zuschnittes und der Stapelbildung ist wiederum stark von den Materialeigenschaften abhängig.

Die Stapelbildung wird im direkten Vergleich zu Wickelverfahren nicht nur als zeitintensiv, sondern auch als extrem fehleranfällig eingestuft (Jung & Park et al. 2018). Zur Qualitätssicherung werden deshalb vor, während und nach dem Stapelvorgang diverse

Merkmale abgeprüft. Vor dem Stapeln erfolgen bspw. eine optische Mehrlagen-, Knickwinkel- und Ableitermittenabstands-Erkennung sowie eine Lageerfassung der Elektroden. Während des Prozesses erfolgen eine optische Positionserfassung der Separatorbahn und mitunter der gestapelten Elektroden sowie eine Dickenmessung des Zellverbundes. Abschließend erfolgt meist eine Gewichtsbestimmung, Isolationswiderstandsmessung sowie ein Hi-Pot-Test (auch Hochspannungsprüfung). Der Umfang der Prüfschritte richtet sich nach den Kundenanforderungen bzw. nach dem Industrialisierungsniveau der Anlage.

Besonders relevant ist überdies die Kontrolle der Bahnzugkraft des Separators, da dieser sehr empfindlich auf Zugbeanspruchung reagiert. Eine überhöhte Bahnzugkraft kann Spannungen im Zellverbund induzieren und Deformation hervorrufen. Der Bahnzug wird deshalb mittels Messwalze erfasst und über den Servo-Antrieb des Abwicklers und einen Tänzer präzise eingestellt (Schmitt & Raatz et al. 2014, S. 10–11). Darüber hinaus erfolgt meist eine beidseitige Bahnkantenerfassung zur Erkennung von Querkontraktion. Zur Vermeidung von Querkontamination liegt eine strikte räumliche Trennung der Anoden- und Kathodenbereiche vor.

2.5.2.3 Komponenten in Stapelmaschinen

Im Folgenden wird detaillierter auf die einzelnen Komponenten in Stapelmaschinen sowie auf deren Funktionen und auf etwaige Herausforderungen eingegangen.

Magazin

Die Entnahme der Elektroden aus den Magazinen, das sog. Abstapeln, erfolgt mittels Vakuum-Greiftechnik und gestaltet sich komplexer als landläufig vermutet. Der Grund dafür liegt in der Doppellagenaufnahme aufgrund diverser adhäsiver Effekte. Diese begründen sich u.a. in der statischen Aufladung der Materialien, dem möglichen Verhaken von Stanzgraten, den selbstklebenden Eigenschaften des Aktivmaterials sowie Unterdruckeffekten beim Abheben (Park & Lim 2015; Götz 1991, S. 115). Da die Magazine mit bis zu 1500 Elektroden Einzelblättern bestückt werden (Kim & Geh et al. 2016), verstärken sich diese Effekte durch das wirkende Eigengewicht der Elektrodenblätter mit zunehmender Entleerung des Magazins (Park & Lim 2015, Götz 1991, S. 118). Um diese Probleme zu adressieren, wird der Vereinzeln von Elektrodenblättern aus dem Magazin u.a. mit einer Vibration des Greifers, gezieltem Einblasen ionisierter Luft sowie der Wahl eines geeigneten Greifer-Typs begegnet (Park & Lim 2015).

Greifer (Endeffektoren)

In kommerziellen Stapelmaschinen ist der Einsatz von Vakuum-Greiftechnik stark verbreitet (Min & Na et al. 2015, Kim 2017). Dieser liegt das physikalische Wirkprinzip „Halten durch Kraftschluss“ zugrunde, wobei die Umsetzung prinzipiell über Vakuum-Sauggreifer, Niederdruckflächensauger oder Bernoulli-Greifer erfolgen kann (Hesse 2011, S. 10). Das Ableiterfännchen der Elektrode wird, unabhängig vom Greifer-Typ, aufgrund des potenziellen Beschädigungsrisikos oft nicht mit angesaugt.

Vakuum-Sauggreifer werden üblicherweise zur Vereinzelung, gemeint ist hierbei die Entnahme von Elektrodeneinzelblättern aus den Magazinen, eingesetzt. Das punktuelle Angreifen und Anheben, vorzugsweise zuerst im Eckbereich, unterstützt den Vereinzelungsvorgang, indem durch die lokal wirkenden hohen Zug- und Abschälkräfte eine Scherbewegung im Stapel induziert wird (Götz 1991, S. 118). Zudem wird ein Nachfließen von (ionisierter) Luft ermöglicht, was Unterdruckeffekten vorbeugt und das unbeabsichtigte Mitreißen weiterer Einzelblätter durch Sogwirkung verhindert (Götz 1991, S. 101–102). Sauggreifer sind dazu meist über eine Spiralfeder nachgiebig aufgehängt, um einerseits eine definierte Anpresskraft sicherzustellen und andererseits ein punktuell und zeitlich versetztes Anheben bei der Vereinzelung der Elektrodeneinzelblätter zu ermöglichen (Shirakawa & Yokota et al. 2010; Götz 1991, S. 94).

Zur Handhabung und Positionierung der Elektrodenblätter auf dem Zellstapel werden üblicherweise **Niederdruckflächengreifer** eingesetzt (Min & Na et al. 2015; Kim 2017). Diese erzeugen über ein feines Lochmuster in der Saugfläche ein Vakuum zwischen der Elektrode und der Saugfläche und zeichnen sich somit durch einen geringen Anpressdruck pro Flächeneinheit und eine geringe mechanische Belastung aus (Fröhlich & Leithoff et al. 2018, S. 341–342). Eine geringe Belastung ist insbesondere wichtig, um Partikelemissionen zu vermeiden (Fleischer & Ruprecht et al. 2012, S. 353–354). Gemäß den Untersuchungen von Fröhlich & Leithoff et al. (2018, S. 344) führt der Einsatz von Flächensaugern zu keiner Erhöhung der Partikelkonzentration in der Produktionsumgebung, sondern trägt vielmehr zu einer Reinigung der Elektrodenoberflächen bei. Ein weiterer wichtiger Aspekt beim Einsatz von Flächengreifern ist, dass die Position der Elektrode am Greifer genauer definiert ist als beim Sauggreifer. Da die Elektrode biegeschlaff ist, ist eine Minimierung der Freiheitsgrade insbesondere im Hinblick auf eine präzise Positionierung wichtig. Abbildung 2-29 gibt einen Überblick über die am häufigsten verwendeten Greifer-Typen in der Stapelbildung.

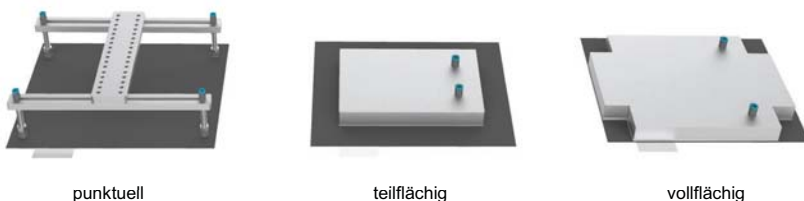


Abbildung 2-29: Exemplarische Darstellung verwendeter Greifer-Typen in Stapelmaschinen

Bei der Verwendung teilflächiger Greifer ist zu beachten, dass aufgrund des Überhangs und damit entstehenden Momentes an der Kante ein Ablösen des Materials vom Greifer induziert wird, was eine Erhöhung des Unterdrucks erfordert (Götz 1991, S. 58–59). Darüber hinaus gilt, dass der Überhang durch die Biegesteifigkeit begrenzt ist – je biegeschlaffer das Material, desto weniger Überhang ist möglich (Götz 1991, S. 103). Zudem unterstützen teilflächige Greifer den Fügeprozess in der Stapelbildung weniger gut als vollflächige Greifer (Götz 1991, S. 101).

Der **Bernoulli-Greifer** bietet den Vorteil einer kontaktlosen Handhabung, findet allerdings keine Anwendung in Stapelmaschinen. Dies liegt darin begründet, dass der Einsatz von Bernoulli-Greifern zu einer höheren Belastung der Elektrode und zu vermehrter Partikelentstehung in der Produktionsumgebung führt. Grund dafür ist das Verhalten der biegeschlaffen Elektrode, denn diese beginnt durch den schnellen austretenden Luftstrom zu oszillieren, wodurch sich Partikel lösen, die anschließend durch den Luftstrom des Greifers in die Produktionsumgebung getragen werden. (Götz 1991, S. 37; Fröhlich & Leithoff et al. 2018, S. 345)

Allgemein ist für den Greifprozess außerdem festzustellen, dass sich Emissionen über eine Reduzierung der Handhabungsoperationen (z.B. Anzahl Greifvorgänge) und Prozesskräfte (z.B. Greifkraft) verringern lassen – diese entstehen gemäß den Untersuchungen von Fröhlich & Leithoff et al. vermehrt im ersten Handhabungsvorgang (2018, S. 343–345).

Handhabungsachsen

Die vorher beschriebenen Endeffektoren werden über ein Portal zwischen Aufnahme-, Ausricht- und Ablageposition bewegt. Die verwendeten Handhabungsachsen werden dabei über elektrische oder pneumatische Aktoren angetrieben, wobei auch eine Kombination beider Aktor-Familien erfolgen kann, vgl. Abbildung 2-30.

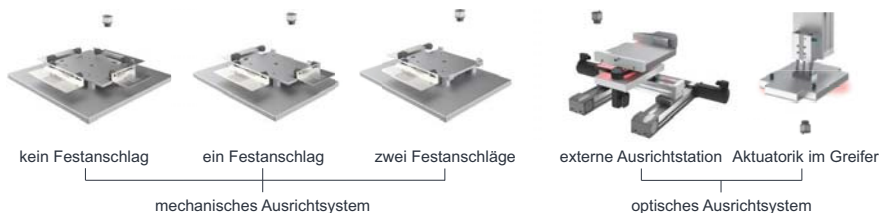


Abbildung 2-31: Exemplarische Darstellung eingesetzter Ausrichtsysteme

Mechanische Ausrichtsysteme stellen die kostengünstigere und einfachere Lösung dar. Die Systeme unterscheiden sich in der Anzahl variabler und fester Anschläge sowie in deren Bewegungsablauf. Bei einer simultanen Bewegung aller beweglichen Anschläge in einem Aufbau ohne feste Anschläge ist die Ausrichtung am schnellsten und genauesten (Min & Na et al. 2015). Üblicherweise werden die variablen Anschläge dabei über eine Feder vom Aktuator entkoppelt, um eine Beschädigung der Elektrodenblattkanten zu vermeiden (Min & Na et al. 2015). Der Aktuator kann bspw. als pneumatischer Zylinder ausgeführt sein (Kim & Geh et al. 2013). Die mechanischen Ausrichtstationen sind aufgrund der abweichenden Grundflächen von Anode und Kathode, vgl. Kap. 2.3.2, nicht identisch (Shirakawa & Yokota et al. 2010). Positive Abweichungen vom Nennmaß können zu einem Aufwölben oder Hochbiegen des Materials führen, negative Abweichungen zu einem Nichtberühren ein oder mehrerer Anschläge (Shirakawa & Yokota et al. 2010; Watanabe & Yuhara et al. 2012). Die fehlende Kompensationsmöglichkeit von Maßabweichungen in mechanischen Ausrichtsystemen führt zu ungewollten Positions- und Orientierungsabweichungen (Ungenauigkeiten).

Bei **optischen Ausrichtsystemen** ist eine indirekte Mittelpunktbestimmung des Elektrodenblattes möglich, wodurch sich Blattlängenschwankungen symmetrisch verteilen lassen. Die Fähigkeit zur Vermittlung von Blattlängenschwankungen bei optischen Systemen ermöglicht somit prinzipiell eine höhere Stapelgenauigkeit. Die Kantenqualität des Elektrodenblattes hat Einfluss auf die Positionserkennung und spielt folglich eine wichtige Rolle im Kontext der Ausrichtung. Die Korrektur der Lage erfolgt entweder über eine externe Ausrichtstation oder über eine in den Greifer integrierte Aktuatorik.

Unabhängig vom verwendeten System, werden bei der Ausrichtung der Elektrodenblätter diverse Merkmale abgeprüft. Der Umfang der Prüfschritte richtet sich nach den Kundenanforderungen sowie dem Industrialisierungsniveau der Anlage. Die Inline-Mes-

sung am Elektrodeneinzelblatt kann u.a. eine Ableiterföhnchen Mittenabstands-Erkennung, fehlerhafte Cut-Angle-Erkennung, Knickwinkel-Erkennung, Doppellagen-Erkennung und Fehllagen-Erkennung beinhalten. Zur Reinigung der Elektrodenblätter werden u.a. Laminarströmungsboxen eingesetzt (Schmitt & Raatz et al. 2014, S. 10).

Stapelstation

Stapelstationen lassen sich in Bezug auf die Antriebsart der Niederhalter unterscheiden, vgl. Abbildung 2-32. Zum Heben und Senken bzw. zur Bewegung der Niederhalter in und aus dem Stapel, können **pneumatische** (Pneumatikzylinder) oder **elektrische Aktoren** (Servomotor mit Kugelgewindetrieb oder Riemenrad und Riemen) sowie eine Kombination beider Antriebsarten eingesetzt werden (Watanabe & Yuhara et al. 2012; Kim 2017). Die Bewegung gegenüberliegender Niederhalter muss dabei stets synchron erfolgen (Kim 2017). Ebenfalls relevant ist die Belastung, welche die Niederhalter auf den Stapel ausüben (Kurfer & Westermeier et al. 2012b, S. 35).

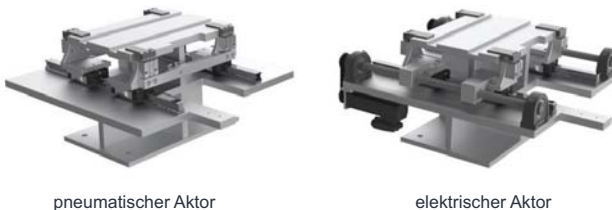


Abbildung 2-32: Exemplarische Darstellung gängiger Stapelstationen

Neben der Bewegung spielt auch die Geometrie der Niederhalter eine wichtige Rolle. Die Niederhalter stehen beim Stapelvorgang nicht nur an deren Unterseite, sondern bei der Übergabe des Elektrodenblattes vom Greifer an die Klemmung auch an deren Oberseite in Kontakt mit dem Material. Um die Belastung auf das Elektrodenblatt und potenzielle Beschädigungen gering zu halten, weisen Niederhalter deshalb oft eine bogenförmige Gestalt in Längs- und Querrichtung auf. (Watanabe & Yuhara et al. 2012)

Ein weiterer kritischer Vorgang ist die Bahnzugkraftregelung der Separatorbahn. Dies liegt daran, dass die Bahn ausgehend von einem fixen Punkt (Walzenpaar) in der Mitte der beiden Abholpositionen gefördert wird. Beim Traversieren zwischen den beiden Abholpositionen kommt es zu einem schnellen **Fördern aus dem Speicher** bei der Bewegung von der Mittelposition in Richtung der Abholposition und einem schnellen **Fördern in den Speicher** bei der Bewegung von der Abholposition in Richtung der Mittelposition. Beim Durchlaufen der Mittelposition kommt es folglich zu einer **Umkehr der**

Bewegungsrichtung der Separatorbahn und insbesondere bei geringen Bahnzugkräften zu einer ruckartigen Beanspruchung („jerk“) des Separators, die Beschädigungen im Bereich der Fixierung (Klemmfinger) induzieren kann. Bei höheren Prozessgeschwindigkeiten ist darüber hinaus eine höhere Bahnzugkraft erforderlich, um ein „Schlagen“ der Bahn im Umkehrpunkt zu vermeiden, was wiederum zu einer höheren Belastung des Separators führt. (Kurfer & Westermeier et al. 2012b, S. 36)

Der „jerk“ kann bei den Stapelanlagen begrenzt werden, um eine Beschädigung der Separatorbahn zu vermeiden. Dies führt folglich auch zu einer Limitierung der Prozessgeschwindigkeit in der Z-Faltung (Kurfer & Westermeier et al. 2012b, S. 37).

2.6 Bearbeitungsspektren der Maschinen

Nachstehend erfolgt eine Betrachtung der durch die Hersteller angegebenen Bearbeitungsspektren der Maschinen über dem recherchierten Zellportfolio. Die Bearbeitungsspektren sind als farbige Flächen gekennzeichnet, wobei jede Farbe einem Hersteller entspricht. Einige Hersteller haben mehrere Anlagentypen im Portfolio und tauchen deshalb mehrfach auf. Der Übersichtlichkeit halber wurde die Anzahl der Hersteller auf drei für die Vereinzelung und vier für die Stapelbildung beschränkt.

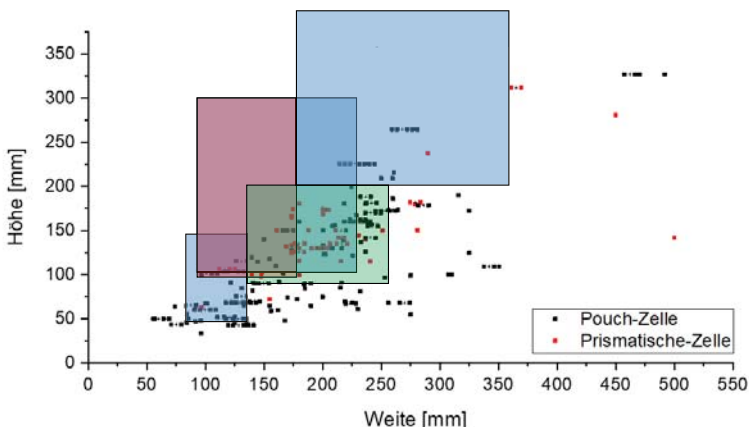


Abbildung 2-33: Bearbeitungsspektrum von Vereinzelungsanlagen mit mechanischer Stanze über dem Zellportfolio

Abbildung 2-33 veranschaulicht die Bearbeitungsspektren von vier Vereinzelungsmaschinen mit mechanischer Stanze. Es ist gut zu erkennen, dass es sich um diskrete Spektren handelt und dass die Auswahl der Hersteller und Anlagentypen stark durch das Format beschränkt ist. Während es sich bei den Vereinzelungsanlagen mit Laser-Notching-Einheit um tatsächliche Spektren handelt, beschreibt das Spektrum bei Anlagen mit mechanischer Stanze quasi nur die Möglichkeit der zu implementierenden Stanzwerkzeuggrößen. Ist das Stanzwerkzeug für ein spezifisches Elektrodenformat angefertigt, bietet die Vereinzelungsanlage kaum noch nennenswerte Freiheitsgrade.

Da der Einsatz von Vereinzelungsanlagen mit Laser-Notching-Einheit oft aufgrund material- oder kostenbedingter Restriktionen nicht möglich ist, wird das zu produzierende Zellformat bereits mit der Definition der Stanzwerkzeuggröße im Vereinzelungsprozess festgelegt (Lutey & Fortunato et al. 2014, S. 174; Pflöging 2017, S. 550).

Abbildung 2-34 zeigt die Bearbeitungsspektren von vier Stapelanlagenherstellern.

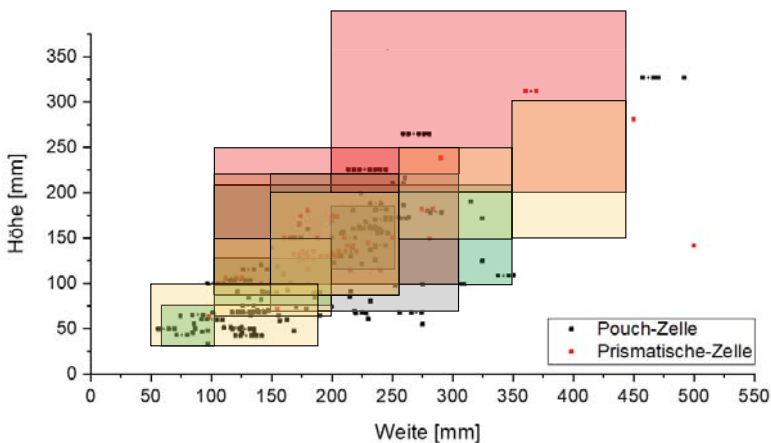


Abbildung 2-34: Bearbeitungsspektrum von Stapelbildungsanlagen über dem Zellportfolio

Es ist zu erkennen, dass sich die Spektren teilweise überdecken und die meisten Anlagenhersteller verschiedene Anlagentypen im Produktportfolio haben, um unterschiedlichste Kundenbedarfe (Elektrodengrößen) bedienen zu können.

Für die Stapelmaschinen gilt ebenfalls, dass das Spektrum lediglich als Rahmen für kundenindividuelle Anpassungsmöglichkeiten zu verstehen ist und keine reelle Flexibilität bei den zu verarbeitenden Elektrodenblattgrößen bietet. Dies liegt an der Formatgebundenheit einiger Komponenten (z.B. Greifer, Bodenplatten) sowie an der Einrichtung und Parametrierung der Maschine auf ein definiertes Elektrodenformat.

Zwischenfazit

Hinsichtlich der Flexibilität der Vereinzelungs- und Stapelbildungsmaschinen ist abschließend festzuhalten, dass diskrete Bearbeitungsspektren zwar theoretisch durch den jeweiligen Anlagentyp abgedeckt werden können, eine Formatänderung allerdings weitreichende Anpassungen nach sich zieht. Für eine Anlagenlösung zur flexiblen Stapelbildung müssen konsequenterweise beide Prozessschritte adressiert werden.

2.7 Zusammenfassung und Ableitung des Forschungsdefizites

Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung des Standes der Technik und der Forschung gegeben. Darauf aufbauend wird der notwendige experimentelle Untersuchungsrahmen abgeleitet und in Kombination mit den Defiziten gegenwärtiger Verfahren als Grundlage für die Entwicklung eines flexiblen Anlagenkonzepts genutzt.

2.7.1 Zusammenfassung des Stand der Technik und Forschung

Der zugrundeliegende Stand der Technik zeigt, dass der Produktionsprozess immer ganzheitlich betrachtet und optimiert werden muss. Dies ist insbesondere im Kontext von **Materialweiterentwicklungen** relevant, da diese – aufgrund der sich ändernden mechanischen Elektrodeneigenschaften – zu Prozessinstabilitäten führen können. Neben den Materialien beeinflusst auch die eigentliche **Prozessführung im Front-End** die mechanischen und geometrischen Eigenschaften der Elektrode und hat so einen bedeutenden Einfluss auf die Prozesssicherheit und Qualität.

In Bezug auf die **Zellbauform** konnte gezeigt werden, dass alle Bauformen von technologischer Relevanz sind. Im Hinblick auf die Flexibilität bietet der Softpack die größtmöglichen Freiheitsgrade und eignet sich deshalb besonders gut zur Verpackung unterschiedlichster Zellverbund-Geometrien.

Der **Zellverbund** wird derzeit bevorzugt aus Elektrodeneinzelblättern und mit kontinuierlichem oder laminiertem Separator aufgebaut. Für einige Branchen gibt es einen

Trend hin zu größeren Zellformaten. Beide Tendenzen konterkarieren nicht den Flexibilitätsgedanken, sondern unterstreichen den kontinuierlichen Wandel von Material und Zellarchitektur zur Optimierung des Gesamtsystems „Batteriezelle“.

In Bezug auf den **industriellen Zellherstellungsprozess** wurde deutlich, dass dieser aus einer Vielzahl von Einzelprozessschritten besteht und sich teilweise stark von den Labor- und Pilotlinien unterscheidet. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Anlagen stark unterschiedliche Fertigungskapazitäten aufweisen und so oft viele Einzelanlagen pro Prozessschritt eingesetzt werden. Dies führt zu hohen Komplexitäten und logistischen Aufwänden in der Linie. Eine Möglichkeit der Komplexitätsreduktion bietet die Funktions- und Prozessintegration. Bezüglich der Durchsatzsteigerung, spielt insbesondere der Übergang von kontinuierlicher zu diskontinuierlicher Prozessführung eine wichtige Rolle, da Änderungen am Zellformat Über- und Unterkapazitäten in der Produktionslinie verursachen können.

Den Prozessschritten **Vereinzeln und Stapeln** kommt eine besondere Bedeutung innerhalb der Prozesskette zu, da diese über den Elektrodenzuschnitt und die anschließende Stapelbildung die Qualität des Zellstapels bestimmen. Die Stapelgenauigkeit ist dabei das Ergebnis der Toleranzen beider Prozessschritte, wobei die jeweils erzielbaren Genauigkeiten materialabhängig sind. Einen wichtigen Stellhebel bei der Erhöhung der Stapelgenauigkeit stellt die Maßhaltigkeit der Elektrodenblätter dar. Beide Prozesse werden über Magazine verkettet, deren Einsatz nicht wertschöpfend, fehleranfällig und zeitaufwendig ist.

Die **Stapelbildung** gilt aufgrund der Vielzahl an Einzeloperationen als fehleranfällig, wobei Winkelfehler bei großen Elektroden besonders kritisch sind. Erschwert wird die Situation durch die hohe Anzahl an Stapelmaschinen in den Produktionslinien und dem damit einhergehenden logistischen Aufwand. Der Stapelprozess legt die Form, Ableiterposition und Stabilität des Zellverbundes fest und hat dadurch Einfluss auf die Prozessführung in den Folgeprozessen sowie auf die Handhabung.

Abschließend konnte gezeigt werden, dass die Maschinen für die Vereinzelnung und Stapelbildung nur **eingeschränkte Bearbeitungsspektren** bedienen können. Die Spektren bieten keine reelle Flexibilität, sondern beschreiben vielmehr den Rahmen für kundenspezifische Anpassungen. Eine Änderung des Zellformates ist im Allgemeinen mit dem Tausch formatgebundener Komponenten, der Neueinrichtung diverser Positionen sowie diversen Prozessparameteranpassungen verbunden.

2.7.2 Ableitung des Forschungsdefizites

Defizit – Prozess- und Produktverständnis

Gegenwärtig existiert in der Literatur **kein detailliertes Gesamtverständnis** für die Prozesse Vereinzelung und Stapelbildung. Es ist offen, welche Komponenten oder Funktionsprinzipien zu **Limitationen** hinsichtlich **Geschwindigkeit, Genauigkeit und Flexibilität** führen. Dieses Wissensdefizit erschwert die Ableitung neuer Produktionsverfahren. Darüber hinaus bietet die Literatur derzeit **keine hinreichenden Erkenntnisse zu Anlage-Material-Wechselwirkungen** im Kontext der Vereinzelung und Stapelbildung, insbesondere im Hinblick auf Material- und Prozessparameteränderungen im Front-End. Die mangelnde Fähigkeit Ursachen für auftretende Problemstellungen zu benennen, erschwert die Definition von Abhilfemaßnahmen und die Ableitung neuer Verfahren.

Der Stand der Technik gibt erste Anhaltspunkte, bspw. Bach (2017, S. 286–290), zu den geometrischen Abmessungen unterschiedlicher Batteriezelltypen. Aufgrund der beschriebenen kontinuierlichen Optimierungen seitens der Zellhersteller und des aus heutiger Sicht weit zurückliegenden Betrachtungszeitraums (2009 bis 2014) ist eine genaue Analyse des aktuell am Markt erhältlichen Zellportfolios unumgänglich. Darüber hinaus soll die Analyse weitere Aspekte, neben den eigentlichen Abmessungen, beinhalten und so Rückschlüsse auf das Zelldesign zulassen.

Defizit – Kommerzielle Verfahren zur Vereinzelung und Stapelbildung

Die **Stapelbildung** ist aufgrund der Vielzahl an Einzeloperationen und deren Diskontinuität sehr **zeitintensiv** und **fehleranfällig**. Die Diskontinuität bedingt darüber hinaus, dass bei Formatänderungen in einer einst optimal ausgelegten Produktionslinie Über- und Unterkapazitäten entstehen können. Aufgrund der hohen Anlagenanzahl und Einzeloperationen sowie des statischen Taktes, betrifft dies insbesondere die Stapelbildung.

Die Visualisierung der Herstellerspektren hat gezeigt, dass die **Vereinzelungs- und Stapelbildungsmaschinen** gegenwärtig **keine reelle Flexibilität** in Bezug auf die zu verarbeitenden Elektrodenblattgrößen bieten. Eine bspw. produktseitige Optimierung des Zellformates, auch um nur wenige Millimeter, führt zu einer Vielzahl an Änderungen sowie Justage- und Einrichtungsaufwänden.

3 Zielstellung und Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird die Zielstellung der vorliegenden Arbeit sowie die Vorgehensweise zur Zielerreichung vorgestellt.

3.1 Zielstellung

Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung eines Anlagenmoduls, welches die Prozessschritte Vereinzeln und Stapeln integriert und in einer flexiblen und kontinuierlichen Lösung umsetzt. Die Ableitung des Anlagenmoduls erfolgt auf der Grundlage von Prämissen sowie ergänzenden komponentenspezifischen Vorversuchen und technologiespezifischen Recherchen.

Die Herleitung der Prämissen basiert auf

- der **Analyse der Anlagentechnik** und verwendeter Komponenten in Vereinzeln- und Stapelmaschinen (Kapitel 2).
- der Durchführung einer **Funktions-, Bewegungs- und Genauigkeitsanalyse** für die Prozessschritte Vereinzeln und Stapeln (Kapitel 4).
- der **Analyse des Zusammenhangs von Zellgröße und -kapazität** zur Abschätzung der notwendigen Bearbeitungsspektren für das Anlagenmodul (Kapitel 4).
- der **Untersuchung des Einflusses materialeitiger Optimierungen** auf die mechanischen Eigenschaften von Elektroden (Kapitel 4).
- der **Analyse von Anlage-Material-Wechselwirkungen** in den Prozessschritten Vereinzeln und Stapeln (Kapitel 4).

3.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise zur Zielerreichung ist in Abbildung 3-1 veranschaulicht. Diese orientiert sich an der VDI 2221, in welcher eine Zerlegung des Gesamtproblems in Teil- und Einzelprobleme empfohlen wird, um über eine schrittweise Lösungsfindung für die Einzel- und Teilprobleme zu einer Gesamtlösung zu gelangen. (VDI 1993)

Die Analyse des **Gesamtproblems** erfolgte ausführlich in Kapitel 2. Dort wurde auf die material- und produktseitigen Optimierungsansätze, die gegenwärtige Prozessführung und Anlagentechnik sowie die restriktiven Bearbeitungsspektren von Vereinzeln- und Stapelanlagen in der Zellfertigung eingegangen.

Die Analyse der **Teilprobleme** erfolgt im folgenden Kapitel 4.1. Diese gliedert sich in eine Funktionsanalyse zur Identifikation von Hauptfunktionen sowie eine Untersuchung von geschwindigkeits-, genauigkeits- und flexibilitätslimitierender Faktoren der gegenwärtigen Anlagentechnik. Darüber hinaus erfolgt eine produktseitige Analyse der Entwicklung geometrischer Zellabmessungen über die Zellkapazität.

Die Analyse der **Einzelprobleme** erfolgt im darauffolgenden Kapitel 4.2 auf Basis der identifizierten Hauptfunktionen aus Kapitel 4.1. Diese stellen den Rahmen für die Analyse von Anlage-Material-Wechselwirkungen dar, wobei der Schwerpunkt der Untersuchungen auf den Folgen mechanischer und geometrischer Eigenschaftsänderungen der Elektrodenbahn und deren Implikationen für den Produktionsprozess liegt.

Auf den Defiziten bewährter Verfahren basierend sowie auf der Grundlage der Analyse von Teil- und Einzelproblemen, werden im Rahmen von Kapitel 4.3 Prämissen zur Auslegung eines flexiblen und kontinuierlich arbeitenden Stapelbildungsverfahrens formuliert, welche in ein Grobkonzept münden.

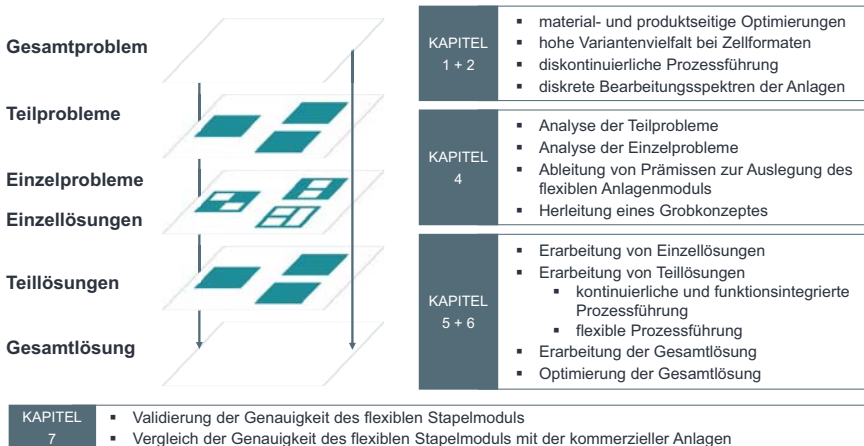


Abbildung 3-1: Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung (in Anlehnung an (VDI 1993))

Auf Basis der Prämissen und des hergeleiteten Grobkonzeptes erfolgt nachfolgend die Auslegung des neuen Anlagenmoduls im Rahmen von Kapitel 5. Diese verläuft sukzessive über die Erarbeitung von Einzellösungen, welche zu Teillösungen und schließlich einer Gesamtlösung integriert werden.

Die **Einzellösungen** werden für zentrale Komponenten des Grobkonzepts erarbeitet und fußen auf den Prämissen sowie Ergebnissen der Wirkzusammenhangsuntersuchungen aus Kapitel 4. Zur Auslegung und Funktionsabsicherung werden ergänzende Vorversuche sowie technologiespezifische Recherchen in Kapitel 5.1 durchgeführt.

Die **Teillösungen** integrieren eine oder mehrere Einzellösungen und dienen der Umsetzung eines funktionsintegrierten, kontinuierlich arbeitenden und flexiblen Handhabungssystems in Kapitel 5.2. Dieses ermöglicht die formatflexible und werkzeugungebundene Vereinzelung der Elektrodenbahn sowie die sukzessive und kontinuierliche Stapelbildung von Einzelblattelektroden.

Die **Gesamtlösung** stellt letztendlich das entwickelte Anlagenmodul in Kapitel 5.3 dar. Dieses integriert alle vorgestellten Einzel- und Teillösungen und ermöglicht die formatflexible und kontinuierliche Herstellung von Elektrodeneinzelblattstapeln. Die Gesamtlösung beinhaltet zudem die Identifikation optimaler Prozessparameter in Kapitel 6, welche die Initialparameter für das anschließende Validierungskapitel darstellen.

Abschließend erfolgt eine **Validierung** in Kapitel 7, in der eine Evaluierung der Positioniergenauigkeiten und Maßhaltigkeiten der Elektrodenblätter sowie Genauigkeitsmessungen am realen Aufbau erfolgen.

4 Analyse der Wirkzusammenhänge

Nach der Darstellung des Standes der Technik und den Herausforderungen in den Prozessschritten Vereinzelung und Stapelbildung, erfolgt nun eine detaillierte Analyse der Teil- und Einzelprobleme. Das Augenmerk der Untersuchungen liegt darauf, die Einflüsse aus dem Front-End in Wechselwirkung mit den Prozess- und Anlagenparametern zu verstehen. Die Erkenntnisse sollen zur Ableitung von Stapel-Kriterien dienen.

4.1 Analyse der Teilprobleme

In diesem Unterkapitel erfolgt eine Analyse der Teilprobleme für die Vereinzelung und Stapelbildung, vgl. Abbildung 4-1. Diese gliedert sich in eine Funktionsanalyse sowie Untersuchung geschwindigkeits-, genauigkeits- und flexibilitätslimitierender Faktoren.



Abbildung 4-1: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 4 (Teil 1)

4.1.1 Funktionsanalyse

Die Funktionsanalyse ist eine symbolische Darstellung einer Handhabungsaufgabe durch **lösungsneutrale Teilfunktionen**. Durch die Anordnung der Teilfunktionen in einer Symbolabfolge aus Elementarfunktionen, ermöglicht die Funktionsanalyse zudem eine Beschreibung des zugrundeliegenden **Verfahrensablaufs**. Grundsätzlich stellt die Analyse ein Werkzeug zur Planungsunterstützung dar und wird nachfolgend zur Identifikation möglicher Verbesserungspotenziale dienen. (VDI 1990, S. 1)

Der Fokus der Analyse liegt darauf, **repetitive** und **qualitätskritische Vorgänge** entlang der Prozesskette zu identifizieren, um die Komplexität verringern und die Effizienz steigern zu können. Hierzu erfolgt die Ableitung von Hauptfunktionen (HF) für die Prozessschritte Vereinzeln und Stapeln, vgl. Abbildung 4-2. Als **Hauptfunktionen (HF)** werden dabei Funktionen definiert, welche einen besonderen Einfluss auf die Prozessgeschwindigkeit, -sicherheit und -qualität haben. Die Teilfunktionen sind der Übersichtlichkeit halber zudem gerätetechnisch zusammengefasst.

Funktionsplan – Vereinzelmasschine



Funktionsplan – Stapelmaschine (Z-Folding)

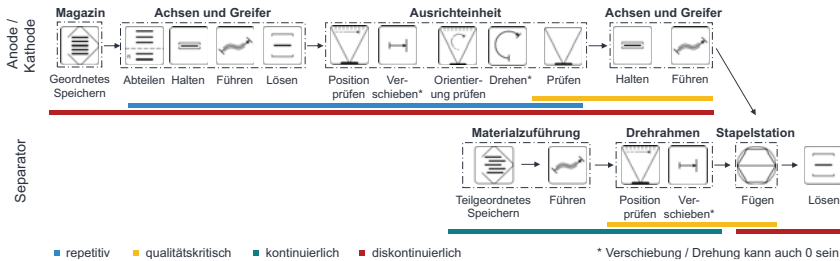


Abbildung 4-2: Funktionsplan einer Vereinzelmasschine und Stapelmaschine (Z-Faltung) mit gerätetechnischer Zusammenfassung (Symbolik: VDI 1990)

HF1 - Materialführung (Führen): Bei der Materialführung spielt eine prozesssichere sowie beschädigungs- und faltenfreie Führung der Materialbahn eine wichtige Rolle. Die Führung kontinuierlicher Bahnmaterialien ist dabei im Allgemeinen prozesssicherer als das Führen von Einzelblattelektroden, da keine Übergabeprozesse (Halten und Lösen) in den Transport involviert sind (Götz 1991, S. 123).

HF2 - Vereinzelung (Formändern): Bei der Vereinzelung kommt es im Hinblick auf die Qualität im Wesentlichen auf zwei Faktoren an – geometrische Maßhaltigkeit und Schnittkantenqualität des Elektrodenblattes. Für eine gute Maßhaltigkeit der Elektroden ist eine optimale Materialführung und Ausrichtung im Prozess notwendig – vgl. weiterführende Untersuchungen in diesem Kapitel. Für eine hohe Schnittqualität und -geschwindigkeit stellt die Fertigungstechnologie einen maßgeblichen Faktor dar.

HF3 - Handhabung (Halten, Verschieben, Lösen): Jeder Handhabungsvorgang ist mit Partikelentstehung und Prozessunsicherheiten in Bezug auf das Halten und Lösen verbunden, vgl. Kapitel 2. Neben der Auswahl eines geeigneten Endeffektors, spielt insbesondere die Reduzierung der Handhabungsvorgänge eine wichtige Rolle.

HF4 - Ausrichtung (Messen, Verschieben, Orientieren): Eine präzise Ausrichtung erfordert Kontrolle über das Materialverhalten in den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Prozessen. Zu einer Reduktion der Fehleranfälligkeit und nicht wertschöpfender Tätigkeiten ist stets darauf zu achten, bereits hergestellte Genauigkeiten beizubehalten

und diese nicht durch unkontrollierte Weitergabe (bspw. durch Genauigkeitsverlust in den Magazinen) zu verlieren (Götz 1991, S. 133).

HF5 – Fügen und Fixierung (Fügen): Beim Fügen und der Fixierung kommt es auf eine kontrollierte Übergabe der in der Ausrichtung hergestellten Position und Orientierung an. Ist das Elektrodenblatt auf dem Zellstapel abgelegt, ist im weiteren Prozessverlauf darauf zu achten, dass die Genauigkeit aufrechterhalten bleibt und nicht über Effekte bei der Interaktion zwischen den Endeffektoren (Flächengreifer, Klemmfinger, etc.) verloren geht (Götz 1991, S. 90).

Fazit der Funktionsanalyse

Die Funktionsanalyse verdeutlicht, dass in Bezug auf die **Materialführung** die Transition von kontinuierlicher zu diskontinuierlicher Prozessführung zu einem möglichst späten Zeitpunkt in der Prozesskette erfolgen sollte, da sich die Anzahl an Handhabungsvorgängen so insgesamt reduzieren lässt. Hinsichtlich der **Vereinzelung** ist eine Integration der beiden formändernden Prozesse (Notching und Ablängen) erstrebenswert, da sich dadurch die Anzahl qualitätskritischer Vorgänge innerhalb der Prozesskette verringern lässt. Die **Handhabung** betreffend, trägt insbesondere das Speichern der Elektroden in den Magazinen zu einer Erhöhung der notwendigen Handhabungsoperationen bei. Durch einen Verzicht auf Magazine lässt sich die Anzahl an Handhabungsoperationen deutlich senken und somit auch die Anzahl qualitätskritischer Vorgänge. Bezüglich der **Ausrichtung** wird deutlich, dass entlang der Prozesskette eine Mehrfacherfassung und -korrektur der Bahn- bzw. Blattposition erfolgt. Da Ausrichtvorgänge zu den qualitätskritischen Funktionen zählen, soll das Ziel darin bestehen, einmal hergestellte Genauigkeiten über die Prozesskette hinweg aufrechtzuerhalten.

4.1.2 Genauigkeits- und Bewegungsanalyse

Im Zuge der eingehenden Funktionsanalyse wurden **repetitive und qualitätskritische Vorgänge** identifiziert, welche nun im Rahmen einer **Genauigkeits- und Bewegungsanalyse auf Geräteebene** (Maschinenkomponenten) näher betrachtet werden. Die Analyse beschränkt sich auf die Prozessschritte Ablängen bis Fixieren und beschreibt zu verfahrenende Wegstrecken sowie Mess-, Regel- und Wiederholgenauigkeiten.

4.1.2.1 Vereinzlung (Singulation Machine)

Genauigkeitsanalyse

Für Rolle-zu-Rolle geführte Prozesse, so auch die Vereinzlung, stellt der Drehrahmen eine wichtige Komponente dar. Dieser ist für ein präzises **Einregeln der Bahnkante** zuständig und hat somit direkten Einfluss auf die Prozessqualität.

Die nachstehende Abbildung stellt die arithmetische Regelgenauigkeit kommerzieller Drehrahmensysteme in Abhängigkeit des verwendeten Sensortyps (Infrarotbreitbandsensor, Ultraschallsensor, CCD-Sensor) dar. Die Genauigkeit der Bahnkantenregelung liegt, abhängig vom Sensor, im Bereich zwischen $\pm 0,05$ und $\pm 0,2$ mm – vgl. Abbildung 4-3. Viele Drehrahmensysteme bieten eine Genauigkeit von bis zu $\pm 0,1$ mm, allerdings wird herstellerseitig auf die Materialabhängigkeit der Angabe verwiesen.

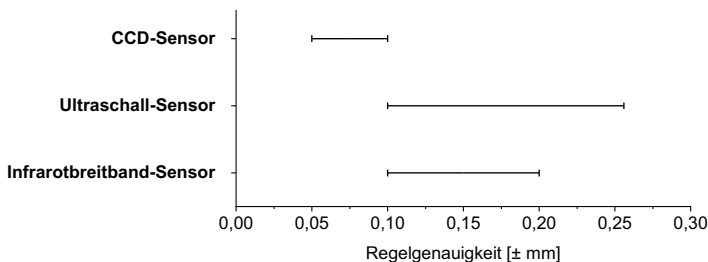


Abbildung 4-3: Regelgenauigkeiten von Drehrahmensystemen (vgl. Anhang B)

Der kontinuierliche **Vorschub der Elektrodenbahn** wird meist über Gurt- oder Zahnriemenförderer umgesetzt. Relevant für die Maßhaltigkeit in Bahnlaufrichtung ist folglich die Synchronisation des Vereinzlers/Greifers mit der kontinuierlich laufenden Materialbahn und darüber hinaus die Kontinuität der Bahn- und Werkzeuggeschwindigkeit.

Bewegungsanalyse

Die Aufgabe des Vereinzlers/Greifers besteht darin, die Elektrodenbahn abzulängen und das dabei entstehende Elektroden Einzelblatt kontrolliert an den nächsten Prozessschritt weiterzugeben. Dies beinhaltet die Funktionen Halten, Formändern, Zuteilen und Lösen. Das Zuteilen kann bspw. über eine Beschleunigung des Ablängwerkzeugs nach dem Trennvorgang erfolgen. Alternativ kann das Elektrodenblatt auch im Fördersystem beschleunigt werden, um dieses aktiv von der Elektrodenbahn abzuteilen. Unabhängig von der konkreten Umsetzung ist es notwendig, einen Abstand zwischen den Elektrodenblättern für den nachfolgenden Inspektionsschritt zu erzeugen.

Das Ablängwerkzeug muss auf das Elektrodenband aufsynchronisiert werden, dass während des Trennprozesses $\Delta v=0$ gilt. Für das Vereinzlungswerkzeug zum Ablängen der Materialbahn gilt, dass die Dauer der Synchronisation t_{sync} über den Takt der Anlage abzüglich der asynchronen Zeit $t_{\text{sync}} = 1/\text{ppm} - t_{\text{async}}$ bestimmt ist. Der nicht synchrone Teil besteht wiederum aus der Zeit, welches das Werkzeug zum Aufsynchronisieren auf die Bahngeschwindigkeit $t_{\text{syncBahnAUF}}$ und ggf. das Förderband $t_{\text{syncBandAUF}}$ benötigt, sowie der Zeit für die Verzögerung am Ende der Wegstrecke $t_{\text{syncBahnAB}}$ (alternativ $t_{\text{syncBandAB}}$) und die Rückstellbewegung $t_{\text{Rück}}$.

Die Länge der zurückzulegenden Strecken hängt von den oben beschriebenen Zeitintervallen sowie der Bahn- und Bandgeschwindigkeit ab. Aus den obigen Überlegungen ergeben sich somit drei bzw. fünf Wegstrecken, siehe Abbildung 4-4:

- Asynchron: $s_{\text{syncBahnAUF}}$ und ggf. $s_{\text{syncBandAUF}}$, $s_{\text{syncBahnAB}}$ oder $s_{\text{syncBandAB}}$
- Synchron: s_{syncBahn} und ggf. s_{syncBand}

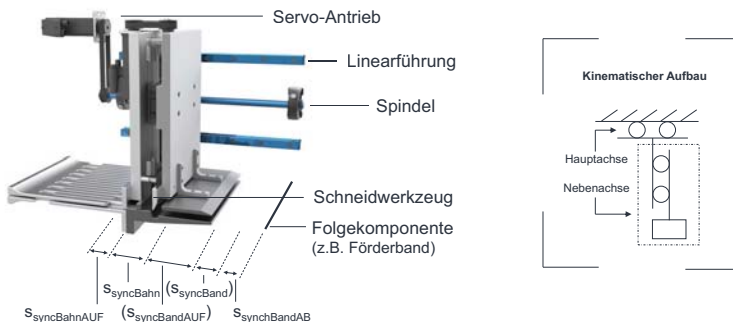


Abbildung 4-4: Exemplarische Darstellung der Bewegungsphasen des Werkzeugs

Mit der Erhöhung der Bahn- und Bandgeschwindigkeit sind im Allgemeinen stärkere Beschleunigungen bzw. Verzögerungen des Werkzeugs verbunden, da der zur Verfügung stehende Gesamtverfahrweg identisch bleibt. Die Bewegung wird üblicherweise über Achsen aus einem Aufbau aus Servomotor und Kugelgewindtrieb (KGT) realisiert (Kim & Go 2013a). Die Analyse der Achsen im folgenden Unterkapitel zeigt, dass Beschleunigungen zwischen 15 und 50 m/s^2 und Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen 1 und 2,5 m/s möglich sind. Der hier beispielhaft beschriebene Aufbau ist folglich durch den zur Verfügung stehenden Gesamtverfahrweg bzw. durch die maximal erreichbare Bahngeschwindigkeit sowie Beschleunigung/Verzögerung limitiert.

Mit der Erhöhung der Elektrodenblattlänge verändert sich die notwendige Dauer zur Synchronisation, Vereinzeln und Blattübergabe zunächst nicht. Allerdings führt eine Erhöhung der Elektrodenblattlänge im hier zugrundeliegenden Aufbau zu einer Verkürzung der Distanz zwischen Elektrodenblattkante und Folgekomponente. In Bezug auf die Rückstellbewegung nimmt die zur Verfügung stehende Zeit zu, da bei gleicher Bahngeschwindigkeit mehr Material durch das Werkzeug nachgeführt werden muss.

4.1.2.2 Stapelbildung (Z-Folding Machine)

Genauigkeitsanalyse

In der Stapelbildung spielen die Positioniergenauigkeit des Ausricht-Systems, bestehend aus Kamerasystem und Kreuztisch (inkl. Dreheinheit), die Wiederholgenauigkeit der Linearachse zur Positionierung des Flächengreifers sowie die Wiederholgenauigkeit der Linearachse zur Positionierung der Stapelstation eine Schlüsselrolle.

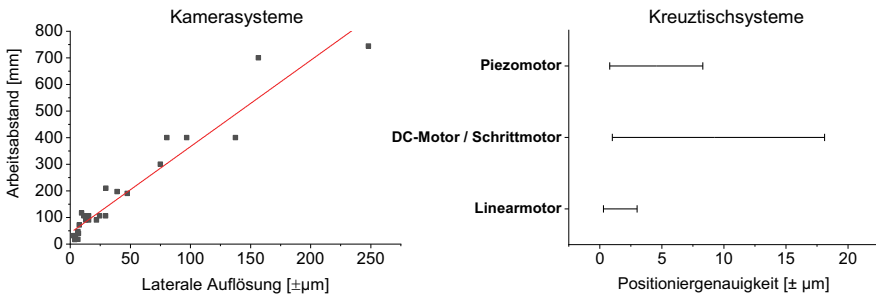


Abbildung 4-5: Genauigkeiten von Kamera- und Kreuztischsystemen (vgl. Anhang C und D)

Für **Kamerasysteme** gilt allgemein, dass deren laterale Auflösung und der Betrachtungsbereich vom Abstand des Kamerasystems zum Objekt abhängig sind. Grundsätzlich gilt, dass mit einem größeren Betrachtungsbereich die Auflösung in laterale Richtung sinkt. Abbildung 4-5 veranschaulicht den allgemeinen Zusammenhang zwischen Arbeitsabstand und lateraler Auflösung der recherchierten Kamerasysteme. Die Genauigkeit optischer Kamerasysteme wird von den Stapelmaschinenherstellern mit etwa $\pm 0,05$ mm angegeben, was auf Basis der Analyse einem maximalen Arbeitsabstand von etwa 200 mm entspricht. Wie bereits beschrieben, ist die Genauigkeit ebenfalls abhängig von der Qualität der erzeugten Schnittkanten.

Neben der Erfassung der Elektrodenblattkontur ist eine Korrektur der Position und Orientierung des Elektrodenblattes über einen **Kreuztisch** erforderlich. Im direkten Vergleich der Genauigkeit eines Kamerasystems mit der eines Kreuztisches, spielt die des Kreuztisches mit $\pm 0,002$ bis $\pm 0,018$ mm eine untergeordnete Rolle, vgl. Abbildung 4-5.

Die Bewegung der Achsen kann über verschiedene **Antriebstechniken** umgesetzt werden. In der Regel kommen Aufbauten aus Linearführung und Kugelgewindetrieb (KGT), in einigen Fällen auch Riementriebe oder Linearmotoren zum Einsatz. Ein Vergleich der Technologien zeigt, dass die Wiederholgenauigkeiten von Kugelgewindetrieb und Linearmotor deutlich über denen des Riementriebs liegen. Die Bewegungsgeschwindigkeit ist bei Riementrieb und Linearmotor am höchsten. Hinsichtlich der max. Beschleunigung dominiert der Linearmotor das Feld, vgl. Abbildung 4-6.

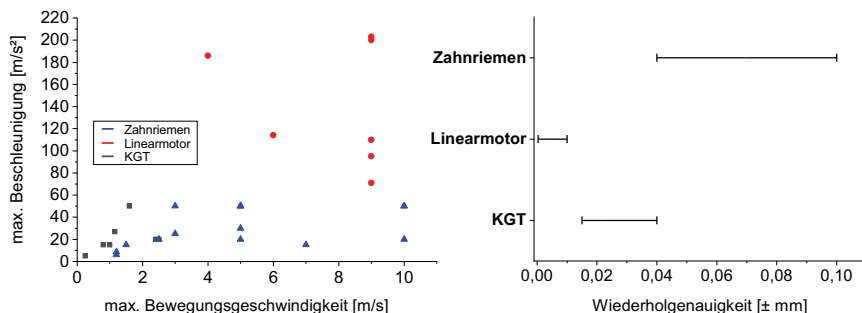


Abbildung 4-6: Leistungsdaten und Wiederholgenauigkeiten von Achstypen (vgl. Anhang E)

Bewegungsanalyse

Stapelmaschinen (Z-Falter) verwenden meist mehrere seriell gekoppelte **Linearachsen zur Erfüllung der Handhabungsaufgabe**, welche die Funktionen Abteilen (Abstapeln), Führen und Fügen beinhalten. Bedingt durch die strikte Trennung des Anoden- und Kathodenprozessstranges, wird ein Aufbau, wie in Abbildung 4-7 dargestellt, in mehrfacher Ausführung (bei „single-location stacking“ in zweifacher Ausführung) benötigt. Der Takt der Linearachse entspricht beim „single-location-stacking“ i.d.R. der Hälfte des Taktes der Stapelmaschine [$\text{ppm}_{\text{Hauptachse}} = 2 * \text{ppm}_{\text{Stapelstation}}$]. Diese zusätzliche Zeit ist notwendig, da neben den eingangs erwähnten Funktionen weitere Funktionen wie Messen (Position, Orientierung), Prüfen (Dimension, Falte etc.) sowie Verschieben/Orientieren erfüllt werden müssen, welche ebenfalls Zeit beanspruchen.

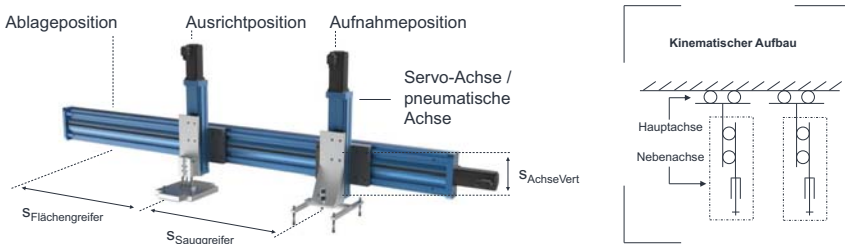


Abbildung 4-7: Exemplarische Darstellung seriell gekoppelter Linearachsen zur Handhabung von Elektroden Einzelblättern in Stapelmaschinen

Der Takt der Linearachse ist durch die Zeit für die Blattaufnahme, das Abschütteln von Doppellagen in der Aufnahmeposition, die Zeit für die Blattablage, den Niederhaltevorgang in der Ablageposition sowie diverse Prüfschritte und den Ausrichtvorgang begrenzt. Darüber hinaus begrenzen die Spezifikationen (max. Beschleunigung und Verfahrgeschwindigkeit) der Linearachse selbst die Prozesszeit nach unten. Um die Geschwindigkeit eines Aufbaus wie in Abbildung 4-7 dargestellt weiter zu erhöhen, können die Nebenachsen oft unabhängig voneinander horizontal verfahren werden.

Die Länge der zurückzulegenden Wegstrecken ist durch den Abstand von Aufnahme- und Ausrichtposition $s_{\text{Sauggreifer}}$ sowie den Abstand zwischen Ausrichtposition und Ablageposition $s_{\text{Flächengreifer}}$ definiert und unabhängig von der zu verarbeitenden Elektrodengröße. Dies liegt an den fixen Positionen der Achsen und Magazine in den Maschinen, welche kein Gegenstand kundenspezifischer Anpassungen sind.

Die **Stapelstation** traversiert während des Stapelvorgangs zwischen den Abholpositionen für die Anoden- und Kathodenblätter (entspricht Ablageposition in Abbildung 4-7) und verfährt zum Ausschleusen oft auf eine separate dafür vorgesehene Position, vgl. Abbildung 4-8. Neben der Dauer für das Zurücklegen der Wegstrecke $s_{\text{Stapelvorgang}}$ entstehen zusätzliche Verweilzeiten an den Abholpositionen, da das Elektrodenblatt vom Greifer an die Klemmung übergeben werden muss. Während des Klemmvorgangs erfolgt ein Niederhalten über den Flächengreifer.

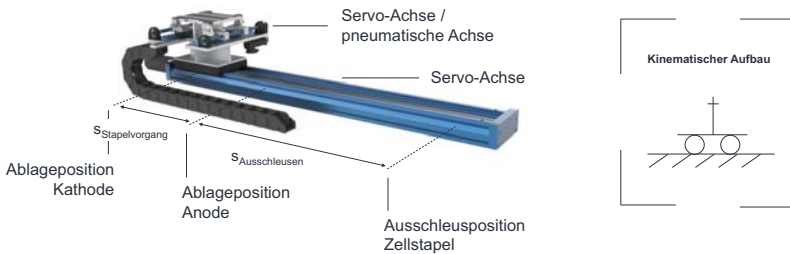


Abbildung 4-8: Exemplarische Darstellung der Lineareinheit zur Bewegung der Stapelstation in Stapelmaschinen

Der Abstand zwischen den beiden Elektroden-Ablagepositionen ist aufgrund der fixen Positionen der Linearachsen unabhängig von der Einzelblattgröße. Um die Stapelgeschwindigkeit zu erhöhen sind u.a. eine Optimierung der Antriebstechnik und/oder eine Reduzierung der zurückzulegenden Wegstrecken und bewegten Massen möglich.

Die Analyse des Anlagenportfolios stützt die obige These. Die nachfolgende Abbildung 4-9 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen dem Bearbeitungsspektrum der Anlagen und der korrespondierenden Stapelgeschwindigkeit. Die Abbildung zeigt, dass Stapelmaschinen mit höheren Stapelgeschwindigkeiten im Allgemeinen geringere Bearbeitungsspektren bieten, wodurch sich ein Trade-off zwischen der Breite des Bearbeitungsspektrums und der zu erreichenden Stapelgeschwindigkeit ergibt. Dies deutet auf eine Bauraumoptimierung bei schnellen Stapelanlagen hin, in welcher die Verfahrenswege zwischen den Aufnahme- und Ablagepositionen minimiert werden.

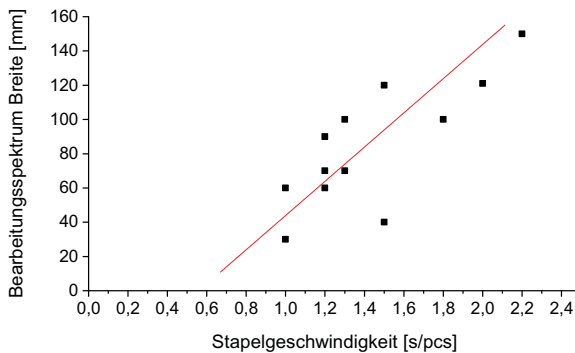


Abbildung 4-9: Zusammenhang zwischen vorgehaltenem Bearbeitungsspektrum und Stapelgeschwindigkeit (für „single-location stacking“)

So ergibt sich für eine Verfahrensgeschwindigkeit der Stapelstation von bspw. 2 m/s und ein Bearbeitungsspektrum von 150 mm folglich ein zusätzlicher Verfahrensweg von 150 mm. Für diesen wird eine zusätzliche Fahrzeit von 0,075 Sekunden benötigt, was eine durchaus relevante Größenordnung für die Stapelbildung darstellt.

Zusammenfassung der Genauigkeitsanalyse:

Für das **Notching und Ablängen** (Singulation) wird die Genauigkeit im Wesentlichen über die Materialführung sowie die Synchronisation der Werkzeuge mit der Materialbahn bestimmt. Die Genauigkeit der Kantenregelung liegt im Bereich zwischen $\pm 0,05$ und $\pm 0,2$ mm, wobei die Mehrheit der Drehrahmensysteme mit einer Regelgenauigkeit von $\pm 0,1$ mm angegeben sind. Bezüglich der Genauigkeit des Zuschnittes in Bahnlängsrichtung kann über die zugrundeliegende Komponentenanalyse keine quantitative Aussage getroffen werden, da diese von der Synchronisation abhängig ist.

Die Toleranzangabe der Hersteller zu der Elektrodenblattbreitentoleranz liegt zwischen $\pm 0,2$ und $\pm 0,3$ mm und somit oberhalb der Genauigkeitsangabe der Drehrahmenhersteller und weiterer beteiligter Komponenten. Dies legt nahe, dass es **weitere Einflussfaktoren** beim Elektrodenblattzuschnitt gibt und es nicht die Maschinenkomponenten sind, welche die Ungenauigkeiten im Blattlängenzuschnitt verursachen. Diese unbekannteren Einflussfaktoren werden in Kapitel 4.2 näher untersucht.

Für die **Stapelbildung** gilt, dass die Positionier- und Wiederholgenauigkeit der Einzelkomponenten vergleichsweise hoch ist. Die Genauigkeit des optischen Ausrichtsystems liegt Herstellerangaben zufolge bei etwa ± 50 μm für einen Abstand von 200 mm zum Objekt. Die Wiederholgenauigkeit einer Linearachse mit Kugelgewindetrieb liegt unterhalb von ± 40 μm , die einer Linearachse mit Linearmotor unterhalb von ± 10 μm .

Für die Vereinzelung und Stapelbildung konnte gezeigt werden, dass es eine Diskrepanz zwischen den kumulierten Toleranzen der genauigkeitsbestimmenden Einzelkomponenten und der Toleranz der Gesamtanlage gibt. Für die Stapelbildung ist dies weitestgehend über die Toleranzen beim Elektrodenblattzuschnitt zu erklären. Allerdings gibt es beim Vereinzeln und der Stapelbildung weitere Diskrepanzen. Effekte dazu werden in Kapitel 4.2 näher untersucht, um vorhandenes Potenzial zu nutzen und entsprechende Gegenmaßnahmen für die Anlagenentwicklung in Kapitel 5 erarbeiten zu können.

Zusammenfassung der Bewegungsanalyse:

Gesamtheitlich betrachtet zeigt sich, dass die Vereinzelmassage („singulation machine“) bezüglich des Taktes etwa doppelt bis viermal so schnell arbeitet wie eine Stapelbildungsmaschine. Da sich der Takt in der Stapelbildung auf die Stapelung von Anoden- und Kathodenblättern bezieht, versorgen zwei Vereinzelmassageanlagen etwa vier bis acht Stapelbildungsanlagen. Die Bahngeschwindigkeit kann zudem durch unterschiedliche Faktoren begrenzt sein, abhängig von der Elektrodenblattlänge.

Für die Stapelbildungsmaschine besteht im Allgemeinen kein Zusammenhang zwischen der Elektrodenblattgröße und dem Takt, da die Position der Linearachsen und damit auch die Ablagepositionen von Anoden- und Kathodenblättern innerhalb einer Anlage identisch bleiben. Die grundlegende Limitation des Z-Stapelverfahrens besteht in der Durchführung von Zu- und Rückstellbewegungen. Diese stellen eine periodische Richtungsumkehr der Endeffektoren dar und erfordern folglich Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge. Die Rückstellbewegung ist darüber hinaus kein wertschöpfender Prozess in der Fertigung. Eine weitere zeitliche Limitation stellt die diskontinuierliche Blattaufnahme und -ablage dar, da diese die Taktzeit nach unten begrenzt. Gleiches gilt für das Erfassen der Blattkontur und die etwaige Korrekturbewegung.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass gegenwärtig ein Trade-Off zwischen Flexibilität und Prozessgeschwindigkeit besteht. Dies liegt in der Optimierung des Bauraumes auf das Elektrodenformat begründet, um Verfahrenswege zu reduzieren.

4.1.3 Flexibilitätsanalyse

In diesem Unterkapitel erfolgt eine produkt- und prozessseitige Flexibilitätsanalyse, mit dem Ziel, die wichtigsten Einflussfaktoren zur Ableitung eines flexiblen Stapelbildungsverfahrens zu verstehen.

4.1.3.1 Produktseitige Anforderungen

Für die Herleitung des flexiblen Stapelbildungsverfahrens spielen insbesondere die am Markt erhältlichen Zellformate eine wichtige Rolle. Diese geben Auskunft darüber, welche Dimensionen (Weite, Höhe, Tiefe) besondere Anforderungen an die Flexibilität stellen und welche Bearbeitungsbereiche in einer Maschine vorgehalten werden müssen. Als Vergleichsgröße wird die Kapazität herangezogen - vgl. Abbildung 4-10.

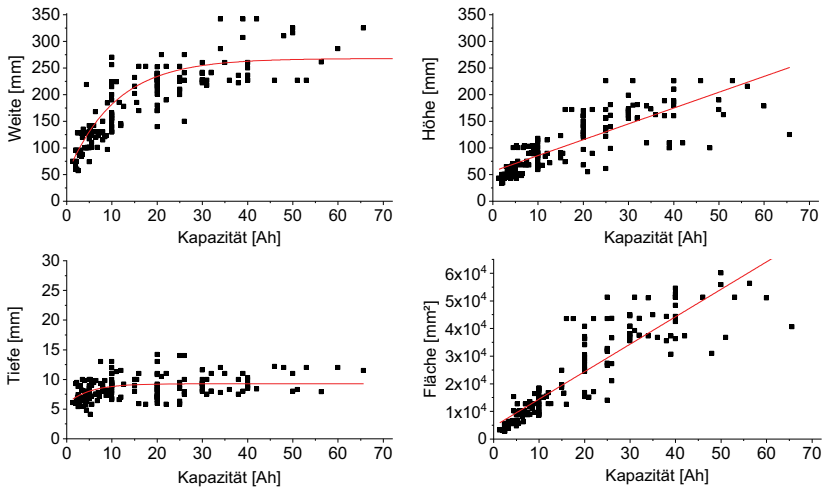


Abbildung 4-10: Zusammenhang von Abmessung und Kapazität (vgl. Anhang A)

Die Grundlage bildet das eingangs vorgestellte Zellportfolio, welches für die nachfolgende Analyse auf Pouch-Zellen reduziert wurde. Die Korrelationsanalyse in Kapitel 2 hat bereits gezeigt, dass sowohl die Weite als auch die Höhe stark mit der Zellkapazität korrelieren, während sich die Tiefe weitestgehend unabhängig zur Kapazität verhält.

In Bezug auf die **Weite**, Abbildung 4-10 links oben, wird deutlich, dass die Steigung der Regressionslinie für kleine Kapazitäten hoch ist und über den weiteren Verlauf stagniert. Insbesondere für kleine Zellformate erfolgt eine **Kapazitätssteigerung** folglich **maßgeblich über eine Vergrößerung der Elektrodenblatt-Weite**. Der Grund für die Stagnation liegt in diversen Faktoren begründet. Dazu gehören u.a. die Verbesserung des Aktiv-Inaktivmaterial-Verhältnisses, die Verwendung performanterer Materialsysteme oder auch etwaige formatseitige Restriktionen in Bezug auf das zur Verfügung stehende Produktionsequipment. Das Bestimmtheitsmaß R-Quadrat der exponentiellen Regressionslinie liegt bei 0,69. Die Weite des recherchierten Zell-Portfolios liegt im **Bereich zwischen 50 und 350 mm**.

Die **Höhe** korreliert ebenfalls stark mit der Kapazität, Abbildung 4-10 rechts oben, entwickelt sich über den Kapazitätsverlauf jedoch tendenziell linear. Die Höhe der Pouch-Zelle spielt folglich eine bedeutende Rolle bei der Realisierung höherer Zellkapazitäten. Das Bestimmtheitsmaß R-Quadrat der linearen Regressionslinie liegt bei 0,65. Die **Höhe der Zellen** im Portfolio beträgt **zwischen 25 und 225 mm**.

Die **Tiefe**, Abbildung 4-10 links unten, korreliert kaum mit der Zellkapazität. Dies liegt u.a. an den fertigungstechnischen Restriktionen hinsichtlich der Anzahl der maximal zu verschweißenden Ableiterföhnchen mit dem Ableiterblech sowie den Limitationen beim Tiefziehen der Pouch-Gehäusehalbschalen. Die **Tiefe der Zellen** bewegt sich im Bereich von **3 bis 15 mm**. Abbildung 4-10 zeigt weiterhin, dass schon bei verhältnismäßig geringen Kapazitäten Tiefen von bis zu etwa 15 mm angeboten werden. (Kim & Kang et al. 2016)

Zusammenfassung der produktseitigen Anforderungen

Basierend auf der obigen Analyse ist festzuhalten, dass sowohl die **Zellweite** als auch die **Zellhöhe** einen **bedeutenden Faktor bei der Realisierung höherer Zellkapazitäten** darstellen, wohingegen die Zelltiefe aufgrund fertigungstechnischer Restriktionen eine untergeordnete Rolle spielt. Darüber hinaus zeigt sich, dass **Zellen zwischen 5 und 20 Ah** eine **besonders hohe Flexibilität hinsichtlich der Zellweite** erfordern, da der Verlauf der Regressionslinie hier besonders steil ist. Die Zellhöhe nimmt grundsätzlich mit steigender Zellkapazität zu, während sich die Zelltiefe für Zellen ab 5 Ah mehr oder weniger unabhängig von der Kapazität verhält.

Die nachfolgende Analyse bezieht sich auf die Vereinzelung und Stapelbildung. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der Prozessführung und Anlagentechnik, erhebt die Analyse keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Ziel der Analyse ist es zu veranschaulichen, welche Implikationen und Anpassungsaufwände eine Veränderung der Elektrodenblattgröße auf den Beispielprozess hat.

4.1.3.2 Vereinzelung (Singulation)

Die Elektrodenbahn erfährt im Prozessschritt Vereinzelung (Singulation) zwei wesentliche Bearbeitungsschritte – Notching und Ablängen. Auf Basis der Eingrenzung aus Kapitel 3.1, wird das Notching nachfolgend nicht näher betrachtet. Wie in Kapitel 2 dargestellt, erfolgt die Herstellung der Einzelblattelektroden in der industriellen Produktion nicht im Vollschnitt, sondern in einem mehrstufigen Prozess.

Für die Pouch-Zelle wurde die Konvention Weite, Höhe und Tiefe für deren geometrische Abmessungen eingeführt, wobei die Weite stets das längere Maß beschreibt. Da in Bezug auf den Vereinzelungsprozess die längere Blattkante sowohl in Bahnlängs-

als auch Bahnquerrichtung entstehen kann, werden zur Beschreibung der nachfolgenden Zusammenhänge die Bezeichnungen Länge und Breite verwendet. Für den Vereinzelungsprozess wird unter der **Länge die Dimension in Bahnaufrichtung** und unter **Breite die Dimension quer zur Bahnaufrichtung** verstanden. Für den Stapelprozess beschreibt die Länge die längere und die Breite die kürzere Dimension der Komponente (Grundplatte, Greifer, etc.).

Im Prozessschritt Vereinzeln erfolgt das Ablängen der Elektrodenbahn mittels Trennwerkzeug. Die dabei theoretisch minimal zu produzierende Elektrodenblattlänge ist im Prozessbeispiel durch den Abstand $l_{\min V}$ gekennzeichnet. Der Abstand zwischen Werkzeugschneide und gegenüberliegender Blattkante der notwendig ist, um das Elektrodenblatt prozesssicher an die Folgekomponente (Förderband, Greifer, etc.) übergeben zu können. Die maximale Länge des Elektrodenblattes ist durch den Abstand $l_{\max V}$ gegeben. Diese ist im nachfolgenden Beispiel abhängig von der Biegesteifigkeit des Materials (Anoden- und Kathodenbahnen) sowie der Ausführung der weiteren Materialführung und Folgekomponenten (Förderband, Greifer), siehe Abbildung 4-11.

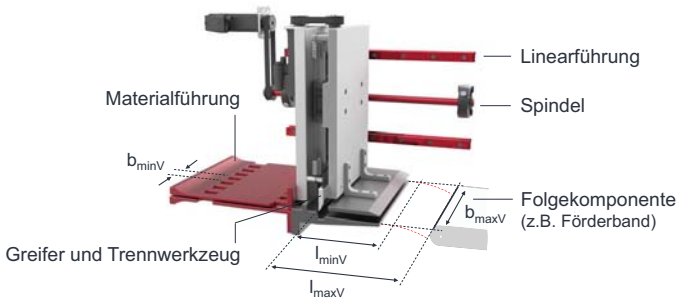


Abbildung 4-11: Formatflexibilität einer Vereinzlungseinheit zum Ablängen der Materialbahn nach dem Notching

Die minimal zu produzierende Breite $b_{\min V}$ hängt im zugrundeliegenden Anwendungsfall von der Materialführung ab. Die Materialbahn sollte eine Mindestbreite $b_{\min V}$ aufweisen, um nicht an den Führungsstegen hängen zu bleiben. Die maximale Breite b_{\max} ist über die Breite des Vereinzlungswerkzeugs $b_{\max V}$ festgelegt.

Nach der Vereinzlung werden die Elektrodenblätter meist in Magazinen zwischengespeichert. Diese können verstellbar ausgeführt sein, wobei die Verstellung über Grundplatten und Streben mit Langlöchern erfolgt, vgl. Abbildung 4-12.

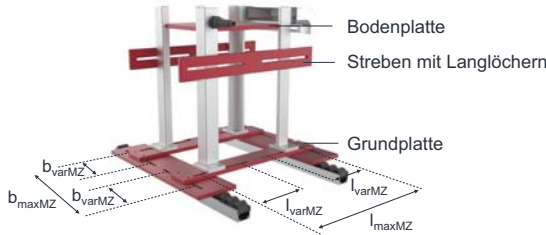


Abbildung 4-12: Formatflexibilität eines verstellbaren Magazins zum Transport geschichteter Einzelelektrodenblätter

Die minimale Länge $l_{\min MZ}$ und Breite $b_{\min MZ}$ ergeben sich aus den Verstellmöglichkeiten des Magazins und den Limitationen des Hubmechanismus. Auf diesen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Die maximale Länge $l_{\max MZ}$ und Breite $b_{\max MZ}$ entspricht dem größtmöglichen Abstand der Profillinienflächen $l_{\max MZ}$ und $b_{\max MZ}$ in der äußersten Langlochposition. Die Bodenplatte ist, auch bei verstellbaren Magazinen, nicht anpassbar und muss formatabhängig neu angefertigt werden.

4.1.3.3 Stapelbildung (Z-Folding)

Nach der Vereinzelung werden die gespeicherten Elektrodenblätter dem Stapelbildungsprozess zugeführt. Wie in Kapitel 2 beschrieben, erfolgt die weitere Handhabung mittels unterschiedlicher Greifer-Typen. Abhängig vom Typ, ergeben sich unmittelbare Einflüsse auf die Flexibilität und Bestimmtheit des Greifprozesses, vgl. Abbildung 4-13.

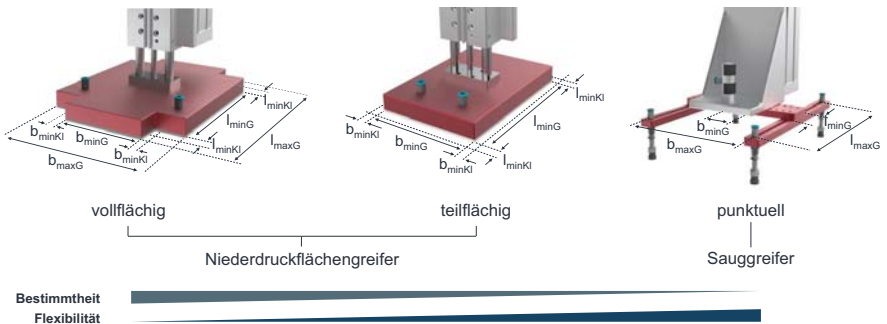


Abbildung 4-13: Formatflexibilität unterschiedlicher Greifer-Typen zur Handhabung von Elektrodenblättern

Der **vollflächige Niederdruckflächengreifer** ist von allen Greifer-Typen am wenigsten flexibel, dafür ist die Position der Elektrode am Greifer aufgrund der geringen unkontrollierten Fläche (Aussparungen im Eckbereich) am bestimmtesten. Da die Übergabe der Elektrode an die Klemmung der Stapelstation über Klemmfinger erfolgt und diese am Elektrodenblatt angreifen müssen, ist die minimale Länge und Breite über den Materialüberstand in den Aussparungen festgelegt, sprich $b_{\min G} + (2 * b_{\min KI})$ bzw. $l_{\min G} + (2 * l_{\min KI})$. Das Maximum wird durch die äußere Länge $l_{\max G}$ und Breite $b_{\max G}$ des Greifers beschrieben.

Der **teilflächige Niederdruckflächengreifer** grenzt sich zum vollflächigen Flächengreifer insofern ab, als dass die Elektrode über dessen Kontur hinausragt. Für den Klemmvorgang sind folglich keine Aussparungen in der Greifer-Kontur selbst notwendig. Die minimale Elektrodengröße ergibt sich aus der Grundfläche des Greifers $l_{\min G} * l_{\max G}$, zuzüglich der Bereiche $l_{\min KI}$ und $b_{\min KI}$, welche zum Niederhalten des Elektrodenblattes beim Stapelvorgang erforderlich sind. Die maximale Elektrodengröße ist für den teilflächigen Greifer aufgrund des Überstandes nicht eindeutig bestimmbar und von den Materialeigenschaften, beispielsweise der Biegesteifigkeit des Elektrodenblattes, abhängig.

Der **Sauggreifer** ist der flexibelste aller Greifer-Typen, da er eine Vielzahl an Verstellmöglichkeiten bietet. Die Saugnäpfe sind meist über Langlöcher und/oder Lochraster in deren Position verstellbar. Die minimale und maximale Länge und Breite ergeben sich über die Verstellmöglichkeiten des Greifers, hier veranschaulicht über die Abstände $l_{\min G}$ und $b_{\min G}$ bzw. $l_{\max G}$ und $b_{\max G}$. Wie beim teilflächigen Niederdruckflächengreifer auch, ist hier ein seitlicher Überstand möglich, welcher zusätzliche Flexibilität in Bezug auf die maximale Länge und Breite bietet.

Nach der Elektrodenblattaufnahme aus dem Magazin wird das Elektrodenblatt mithilfe einer **Ausrichtstation** positioniert und orientiert. Dieser Vorgang kann wahlweise über mechanische oder optische Ausrichtstationen erfolgen, vgl. Abbildung 4-14.

Im Falle der **mechanischen Ausrichtstation** sind die Anschläge häufig über Langlöcher in deren Position verstellbar. Für diesen Fall ergibt sich eine minimale zu verarbeitende Länge $l_{\min AusM}$ von $l_{\max AusM} - l_{\max VarM}$ und eine minimal zu verarbeitende Breite $b_{\min AusM}$ von $b_{\max AusM} - b_{\max VarM}$. Die maximale Elektrodenblattgröße wird über die Bodenplatte definiert, da die Elektrode zur genauen Ausrichtung stets flächig aufliegen (geometrische Defekte nach Kalandrierung) muss. Bei vielen Anlagentypen ist diese

Variabilität nicht gegeben und die Anschläge fahren direkt gegen die Bodenplatte. In diesem Fall entsprechen die Maße der Bodenplatte dem Nennmaß des Elektroden-einzelblattes. Die Genauigkeit mechanischer Stationen ist aufgrund der Toleranzen beim Elektrodenblattzuschnitt folglich stark materialabhängig.

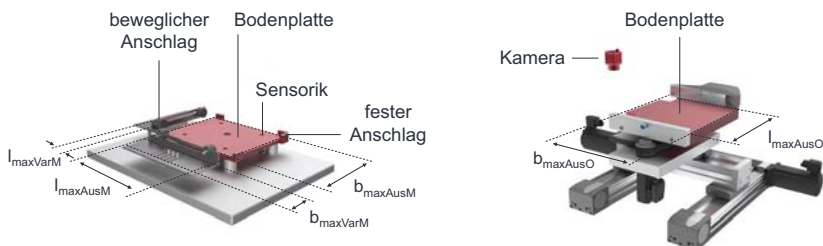


Abbildung 4-14: Formatflexibilität mechanischer und optischer Ausrichtstationen zur Positionierung und Orientierung von Elektrodenblättern

Für die **optische Ausrichtstation** gilt, dass die Elektrode für eine präzise Ausrichtung ebenfalls stets auf der Bodenplatte aufliegen muss. Folglich definiert diese die maximal zu verarbeitenden Elektrodenmaße. Ein weiteres Hindernis bezüglich der Flexibilität stellt die verbaute Sensorik dar (Cut-Angle-Erkennung, Knickwinkel-Erkennung etc.), welche in ihrer Position ebenfalls verstellt oder angepasst werden muss.

Im letzten Schritt erfolgt die Übergabe der Einzelelektrodenblätter an die Niederhalter der Stapelstation, auf welche nicht detaillierter eingegangen wird.

Zusammenfassung der Flexibilitätsanalyse

Kapitel 4.1.3 veranschaulicht, dass die Formatflexibilität nicht nur über die Stapelbildungsmaschine selbst, sondern insbesondere auch über den Zuschnitt der Einzelelektrodenblätter sowie die anschließende Speicherung (Magazin) beschränkt wird. Für die Stapelmaschine ist festzuhalten, dass diese zwar prinzipiell für die Verarbeitung unterschiedlicher Elektrodenblattgrößen im vorgesehenen Bearbeitungsspektrum geeignet ist, ein Formatwechsel allerdings mit weitreichenden Anpassungen (z.B. Boden- und Grundplatten, Sensorpositionen) sowie Einrichtungsaufwänden (Ausrichtung zur Stapelposition) verbunden ist. Die herstellerseitige Angabe ist daher als Anpassungsspielraum für den jeweiligen Maschinentyp auf die kundenseitige Produktspezifikation (Elektrodenformat, Ableiterposition etc.) zu interpretieren und nicht als reelle Flexibilität.

4.2 Analyse der Einzelprobleme

Die Genauigkeitsanalyse in Kapitel 4.1 verdeutlicht, dass es eine Diskrepanz zwischen der Maschinengenauigkeit und der Stapelgenauigkeit (Zellstapel) gibt. Ursächlich hierfür sind die materialeitigen Einflussfaktoren in den Prozessen, welche in diesem Kapitel näher untersucht werden, um entsprechende Gegenmaßnahmen in die Konzeption miteinbeziehen zu können.



Abbildung 4-15: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 4 (Teil 2)

Das Kapitel gliedert sich in die in Kapitel 4.1 identifizierten Hauptfunktionen. Diese stellen den Rahmen für die nachfolgende **Analyse der Anlage-Material-Wechselwirkungen** dar. Die Einzeleinflüsse zu den jeweiligen Hauptfunktionen werden in den entsprechenden Unterkapiteln dargestellt, wobei der Schwerpunkt der Analyse auf den Folgen mechanischer und geometrischer Änderungen der Elektrodenbahn in Bezug auf den Produktionsprozess liegt.

4.2.1 Materialführung

Bezüglich der Materialführung werden die Einflüsse materialeitiger Optimierungsansätze, vgl. Kapitel 2.2.3, und deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Elektrode in Wechselwirkung mit den Prozessparametern untersucht. Zur Beantwortung der komplexen Zusammenhänge werden vier Forschungsfragen formuliert und beantwortet.

F1: Welchen Einfluss hat die Verdichtung (Prozessschritt Kalandrieren) auf die Biegesteifigkeit von Anoden- und Kathodenbahnen?

Untersuchungen von Gupta & Ücel et al. (2020) haben gezeigt, dass sich zur Bestimmung der Aktiv Materialeigenschaften von Elektroden, bestehend aus Beschichtung und Kollektorfolie, ein Biegeversuch deutlich besser eignet als ein Zugversuch. Dies begründen die Autoren damit, dass die Zugkraft im Zugversuch mehrheitlich durch die

hohe Steifigkeit des Kollektors bestimmt wird, wohingegen beim Biegeversuch das Aktivmaterial zu etwa 85 % am Ergebnis beteiligt ist (Gupta & Ücel et al. 2020, S. 852).

Aus Ermangelung an Standardprüfverfahren zur Biegesteifigkeitsmessung an Elektrodenbahnen, wurde die DIN (2003a) herangezogen. Diese beschreibt ein Prüfverfahren zur Messung von Kunststoff-Folien sowie textiler Flächengebilde mit und ohne Kunststoffdeckschicht. Anwendbar ist das Verfahren auf Probenkörper mit mittlerer Biegesteifigkeit, die sich nicht einrollen, kräuseln oder im Kantenbereich umgeknickt sein dürfen. (DIN 2003a, S. 3)

Aufgrund dessen, dass die Partikel über einen Kunststoff (Binder) zusammengehalten werden, welcher auf dem Stromsampler gewissermaßen ebenfalls als Deckschicht fungiert, soll die Norm für die Untersuchungen der Biegesteifigkeit von Elektroden herangezogen werden. Die Biegesteifigkeit B wird in der Norm als „ein Maß für den Widerstand, den ein Probekörper dem Bestreben, sich beim Einwirken von Kräften (Eigengewicht) zu biegen, entgegensetzt“ definiert. (DIN 2003a, S. 4)

Beschreibung des Biegesteifigkeitsprüfgeräts und Verfahrensablaufs

Die Probe (rot) wird auf einer waagerechten Auflagefläche bündig zur Vorderkante platziert und über einen Schieber mit einer rutschfesten Unterseite über die Kante nach vorne geschoben – vgl. Abbildung 4-16. Der Probenkörper muss dabei eine Breite von 25 mm und eine Länge von 250 mm aufweisen, wobei der Versuch innerhalb von 10 Sekunden beendet sein muss. Der Versuch gilt als abgeschlossen, sobald der Probenkörper die schiefe Ebene berührt, welche um $41^\circ 30'$ zur waagerechten Auflagefläche geneigt ist. Für den Fall, dass die Vorderkante leicht verdreht oder gewölbt ist, ist die Kantenmitte als Vorderkante anzusehen. Nach dem Test ist die Überhanglänge $l_{\text{Ü}}$ an der Skala des Schiebers abzulesen. (DIN 2003a, S. 5–7)

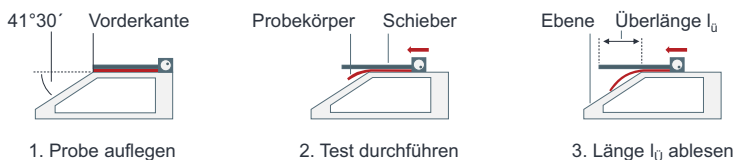


Abbildung 4-16: Prüfablauf beim Verfahren (in Anlehnung an (DIN 2003a, S. 6))

Die Auswertung erfolgte ebenfalls gemäß der Norm, wobei sich die **Längengewichtskraft** F_1 [mN/cm] über

$$F_1 = g_n * \frac{m}{l} \quad 4-1$$

mit m für die Probekörpermasse, l für die Probenkörperlänge und g_n für die Fallbeschleunigung und die **Biegesteifigkeit** B [mNcm²] über

$$B = F_1 * \left(\frac{l_{\ddot{u}}}{2}\right)^3 \quad 4-2$$

mit $l_{\ddot{u}}$ für die Überhanglänge berechnen lässt (DIN 2003a, S. 4).

Die nachfolgenden Untersuchungen basieren auf kommerziellen Elektrodenbahnen, auf deren genaue Materialzusammensetzung nicht eingegangen werden kann. Die Elektrodenbahnen lagen beidseitig beschichtet vor, wobei die Anodenbahn einen 10 µm dicken Kupfer-Kollektor und die Kathodenbahn einen 20 µm dicken Aluminium-Kollektor einschloss. Die unkalandrierte Elektrodenbahndicke betrug 153 µm (Kathode) bzw. 150 µm (Anode). Das Material diente als Ausgangsbasis zur Herstellung von Elektrodenbahnen mit drei unterschiedlichen Kalandriergraden, vgl. Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Anzahl und Parameter durchgeführter Biegesteifigkeitsprüfungen

| Kathoden-Proben | | | Anoden-Proben | | |
|-----------------|----------------|--------|---------------|----------------|--------|
| Probendicke | Kalandriergrad | Anzahl | Probendicke | Kalandriergrad | Anzahl |
| 153 µm | 0 % | 5 | 150 µm | 0 % | 5 |
| 126 µm | 18 % | 5 | 135 µm | 10 % | 5 |
| 120 µm | 22 % | 5 | 132 µm | 12 % | 5 |
| 112 µm | 27 % | 5 | 121 µm | 19 % | 5 |

An dieser Stelle ist es wichtig zu erläutern, warum der Versuch mit beidseitig beschichtetem Material erfolgt. Erstens kann sich einseitig beschichtetes Material nach der Kalandrierung einrollen und wird somit explizit von der DIN (2003a) ausgeschlossen. Zweitens ist die Steifigkeit in Kompressions- und Zugrichtung unterschiedlich, womit sich die Frage nach der Orientierung der Probe im Versuch und den Eigenschaften einer beidseitig beschichteten Elektrode stellen würde (Gupta & Ücel et al. 2020, S. 858). Das unterschiedliche Materialverhalten in Zug- und Druckrichtung erklären die Autoren über die Entstehung zusätzlicher Partikel-Partikel und Partikel-Binder Kontakte der porösen

Schicht in Kompressionsrichtung. Darüber hinaus verschiebt sich bei einer einseitig beschichteten Elektrode der Verlauf der neutralen Faser innerhalb der Aktivmaterialschicht in Abhängigkeit der Beschichtungsdicke und kann so zu Problemen bei der Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse führen (Gupta & Ücel et al. 2020, S. 852).

Abbildung 4-17 veranschaulicht die Ergebnisse der Biegesteifigkeitsprüfungen. Die Messungen wurden im Rahmen der angeleiteten Arbeit von A_Zhang (2019) durchgeführt und bilden die Grundlage für die nachstehende Auswertung.

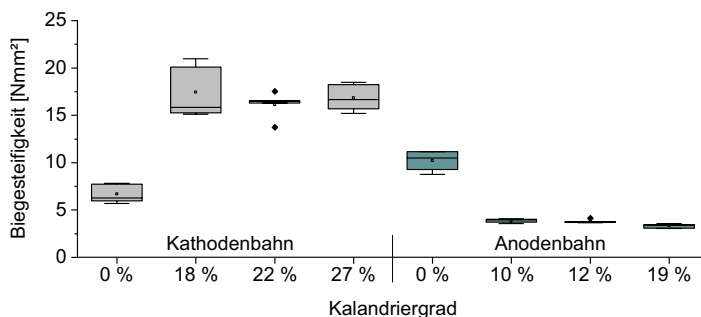


Abbildung 4-17: Biegesteifigkeit in Abhängigkeit von Material und Kalandriergrad

In Bezug auf die **Kathoden-Proben** führt eine mittlere Kalandrierung (18%) bereits zu einer stark ansteigenden Biegesteifigkeit, vgl. Abbildung 4-17. Dies liegt, wie von Zheng & Tan et al. (2012, S. 54) und Schilling & Schmitt et al. (2016, S. 1503) beschrieben, an den zusätzlichen Partikelkontakten die sich beim Verdichtungsvorgang ausbilden, welche gemäß den Ausführungen von Gupta & Ücel et al. (2020, S. 858) wiederum zu einer Erhöhung der Biegesteifigkeit führen. Ein weiterer Grund für die Erhöhung könnte in der Induktion von Eigenspannungen liegen, wie in Michaelis & Rahimzei et al. (2018, S. 48) beschrieben. Bei einer weiteren Erhöhung des Kalandriergrades verändert sich die Biegesteifigkeit hingegen kaum noch, da nur noch wenige zusätzliche Kontakte ausgebildet werden. Der mit der weiteren Kalandrierung abnehmende Probenquerschnitt und die Erhöhung der Biegesteifigkeit scheinen sich in ihren Effekten aufzuheben.

Hinsichtlich der **Anoden-Proben** zeigt sich ein gegenläufiges Verhalten. Eine leichte Kalandrierung auf Anodenseite führt am geprüften Material zu einer starken Verringerung der Biegesteifigkeit. Dies kann zum einen darin begründet liegen, dass Graphit-Teilchen wesentlich weicher sind als NMC-Teilchen und die Reibung zwischen ihnen geringer ist (Mayer & Bockholt et al. 2017, S. 175). Zum anderen berichten Sheng &

Fell et al. (2014, S. 6), dass es bei der Kalandrierung von Graphit-Partikeln neben der Verdichtung zu einer Gleitbewegung der Partikel untereinander kommt, wodurch weniger neue Kontakte ausgebildet werden. Die Verringerung des Probenquerschnitts durch die Kalandrierung scheint hier deutlich schwerer zu gewichten als die Zunahme des E-Moduls. Analog zu den Kathodenbahnen ändert sich mit einer weiteren Erhöhung des Kalandriergrades die Biegesteifigkeit kaum noch.

Auf den Einfluss unterschiedlicher Beschichtungsdicken soll im Rahmen dieser Arbeit nicht detaillierter eingegangen werden. Eigene Untersuchungen im Rahmen des öffentlich geförderten Projektes „HighEnergy“ haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Beschichtungsdicke zu einer Erhöhung der Biegesteifigkeit führt und dass die Variation der Beschichtungsdicke einen weitaus größeren Effekt hat als die Kalandrierung. Allgemein gilt, dass die Dicke mit der dritten Potenz in den Biege widerstand eingeht (Götz 1991, S. 20).

Die Eigenschaften der Aktivmaterialschicht werden materialseitig zudem stark durch den verwendeten Binder und Leitrüß beeinflusst, was im weiteren Verlauf der Arbeit detaillierter untersucht wird (Gupta & Ücel et al. 2020, S. 847).

Fazit:

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, dass die Biegesteifigkeit durch die Prozesse des Front-Ends (Beschichtung, Kalandrierung) und das Material (Anode, Kathode) beeinflusst wird. Im Hinblick auf die Konsequenzen, welche sich aus den Optimierungsansätzen, vgl. Kapitel 2.2.3, ergeben, führt ein höherer Verdichtungsgrad zu unterschiedlichen Einflüssen auf die Biegesteifigkeit von Anoden- und Kathodenbahnen und hat damit unterschiedliche Implikationen für die Folgeprozesse Vereinzeln und Stapeln.

F2: Welchen Einfluss haben die Variation des Binderanteils und die Änderung der Leitrüßstruktur auf die Zugfestigkeit der Aktivmaterialbeschichtung?

Da Binder und Leitrüß einen signifikanten Einfluss auf die Aktivmaterialeigenschaften haben (Gupta & Ücel et al. 2020, S. 847) soll in diesem Abschnitt ergründet werden, wie sich eine Änderung deren Anteile auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt. Im Folgenden wird dazu kurz auf die Vorgehensweise, die Schichtzusammensetzungen sowie die Herstellprozedur eingegangen, gefolgt von der Darstellung der Ergebnisse.

Beschreibung der Vorgehensweise

In diesem Abschnitt wird eine weitere Methode zum Testen von Aktivmaterialeigenschaften vorgestellt. Diese kann angewendet werden, sofern die Elektrodenherstellung selbst erfolgt und orientiert sich an dem Vorgehen von Yim & Choi et al. (2014) und Zheng & Tan et al. (2012). Die Grundidee ist dabei der Verzicht auf eine Trägerfolie, da diese die Ergebnisse stark beeinflusst und zu vorzeitigem Versagen neigt.

Die Vorgehensweise in Yim & Choi et al. (2014) besteht darin, unterschiedliche Binder-schichten auf ein Substrat (Teflon oder Glas) aufzubringen, welches eine möglichst geringe Haftfestigkeit mit dem jeweiligen Binder aufweist. Anschließend werden die getrockneten Filme in gleichgroße Proben geschnitten, abgelöst und deren mechanische Eigenschaften mittels Zugversuch bestimmt. (Yim & Choi et al. 2014, S. 113)

Die Vorgehensweise von Zheng & Tan et al. (2012, S. 53) besteht in der Herstellung dicker Elektrodenaktivmaterialschichten, dem Ablösen der Beschichtung vom Stromsammel (Aluminiumfolie) und der anschließenden Testung der Filme. Haselrieder (2016, S. 187) kommentierte, dass dieses Vorgehen zu potenziellen Materialschädigungen (z.B. Entmischung) führen kann und die Genauigkeit aufgrund der dünnen und sehr filigranen Filme in Frage zu stellen ist.

Die **Vorgehensweise im Rahmen dieser** Arbeit wurde entsprechend der Kritik von Haselrieder angepasst und besteht darin, die Elektrodenpaste möglichst dickschichtig auf eine Folie mit schlechten Hafteigenschaften zu Rakeln, die Bahnen mit einer möglichst geringen Trocknungsrate zu trocknen, die Proben aus der Schicht herauszutrennen und stichpunktartig auf deren Homogenität zu prüfen sowie die einzelnen Proben anschließend in einem Zugversuch zu testen – vgl. Abbildung 4-18.

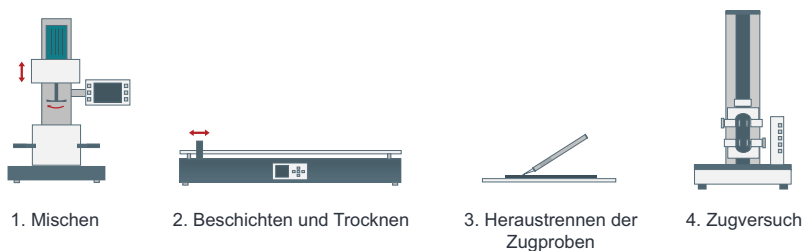


Abbildung 4-18: Vorgehensweise zur Bestimmung der Materialeigenschaften von Aktivmaterialschichten

1. Mischen

Die **Anoden-Aktivmaterialschicht** bestand aus dem **Aktivmaterial** Hitachi SMG-A, dem **Leitruß** Imerys Super C65 bzw. VGCF, den **Bindern** CMC Walocel CRT 2000PA und SBR JSR Micro TRD2001 (im Verhältnis 2:3) sowie **destilliertem Wasser** als Lösungsmittel. Das CMC (Carboxymethyl Cellulose) lag in einer 3%-igen, das SBR in einer 48%-igen Wasserlösung vor. Die exakten Anteile sind Tabelle 4-2 zu entnehmen.

Tabelle 4-2: Zusammensetzung der Anoden-Aktivmaterialschichten mit unterschiedlichen Binderanteilen und Leitruß-Typen

| Aktivmaterial | Anteil relativ [%] | | | Anteil absolut | Leitruß-Typ | Dichte (berechnet für 50% Porosität) | |
|---------------|--------------------|------------|------------|-----------------|-------------|---|---------------|
| | Leitruß | Binder CMC | Binder SBR | | | | |
| 93,502 | 1,898 | 1,750 | 2,850 | 100 / 2 / 2 / 3 | C65 | 1,094 | <i>Std.</i> |
| 94,494 | 1,918 | 1,769 | 1,819 | 100 / 2 / 2 / 2 | C65 | 1,098 | <i>Var. 1</i> |
| 95,460 | 1,938 | 1,787 | 0,816 | 100 / 2 / 2 / 1 | C65 | 1,103 | <i>Var. 2</i> |
| 93,502 | 1,898 | 1,750 | 2,850 | 100 / 2 / 2 / 3 | VGCF | 1,094 | <i>Std.</i> |
| 94,494 | 1,918 | 1,769 | 1,819 | 100 / 2 / 2 / 2 | VGCF | 1,098 | <i>Var. 1</i> |
| 95,460 | 1,938 | 1,787 | 0,816 | 100 / 2 / 2 / 1 | VGCF | 1,103 | <i>Var. 2</i> |

Die **Mischprozedur** des **Anoden-Slurry** erfolgte identisch für alle Ansätze und in drei Phasen. Zuerst wurde der Leitruß und wässrig-gelöste CMC Binder für 10 Minuten zu einer Matrix dispergiert. Im Anschluss erfolgte die Zugabe des Aktivmaterials in drei Schritten und einem zeitlichen Abstand von einer Minute, gefolgt von einem 13-minütigen Mischvorgang. Zum Mischen wurde ein Stabrührgerät mit 70 mm VMA Dissolver-scheibe eingesetzt. Aufgrund der Empfindlichkeit des SBR Binders wurde dieser erst am Schluss zugegeben und für zwei Minuten untergerührt.

Tabelle 4-3: Zusammensetzung der Kathoden-Aktivmaterialschichten mit unterschiedlichen Binderanteilen und Leitruß-Typen

| Aktivmaterial | Anteil relativ [%] | | | Anteil absolut | Leitruß-Typ | Dichte (berechnet für 50% Porosität) | |
|---------------|--------------------|---------|-------------|-----------------|-------------|---|---------------|
| | Leitruß | Graphit | Binder PVdF | | | | |
| 92,593 | 2,778 | 1,852 | 2,778 | 100 / 3 / 2 / 3 | C65 | 2,100 | <i>Std.</i> |
| 93,458 | 2,804 | 1,869 | 1,869 | 100 / 3 / 2 / 2 | C65 | 2,127 | <i>Var. 1</i> |
| 92,593 | 2,778 | 1,852 | 2,778 | 100 / 3 / 2 / 3 | VGCF | 2,100 | <i>Std.</i> |
| 93,458 | 2,804 | 1,869 | 1,869 | 100 / 3 / 2 / 2 | VGCF | 2,127 | <i>Var. 1</i> |

Die **Kathoden-Aktivmaterialschicht** bestand aus dem **Aktivmaterial** BASF NMC 622, zwei **Leitadditiven** Leitruß Timcal Super C65 bzw. VGCF und Graphit Timcal KS6L, dem **Binder** PVdF Solef 5130 sowie NMP als **Lösungsmittel**, siehe Tabelle 4-3.

Die **Mischprozedur** des **Kathoden-Slurry** wurde für alle Mischansätze analog durchgeführt und bestand ebenfalls aus drei Phasen. In der ersten Phase, wurden die Leitadditive mit dem Binder zu einer Matrix dispergiert. Hierzu wurden die Leitadditive Timcal Super C65 und Timcal KS6L bzw. Timcal Super C65 und VGCF zusammen mit dem Binder Solef 5130 und der Hälfte des Lösemittels für 50 Minuten gemischt. Im Anschluss erfolgte die Zugabe des restlichen Lösemittels und des Aktivmaterials. Anschließend erfolgte ein weiterer 30-minütiger Mischvorgang, wobei die letzten 10 Minuten unter Vakuum gemischt wurden um Luftpneinschlüsse zu entfernen.

2. Beschichten und Trocknen

Im Anschluss an den Mischvorgang wurden die unterschiedlichen Anoden- und Kathoden-Slurries auf spezielle Folien (Anode: Nitto SPV-224PR, Kathode: PTFE) beschichtet, an welchen die Aktivmaterialschicht nach der Trocknung unzureichend anhaftet. Die Beschichtung erfolgte mittels Filmziehtisch und Rakel. Als Vorschubgeschwindigkeit wurden 15 mm/s gewählt, die eingestellte Nassfilmdicke für die Rakel betrug 2,7 mm. Die Trocknung erfolgte bei 21° C Raumtemperatur und ohne zusätzliche Wärmezufuhr um eine möglichst geringe Trocknungsrate zu erreichen und so Rissbildung und Bindermigration vorzubeugen (Font & Protas et al. 2018, S. 14–15).

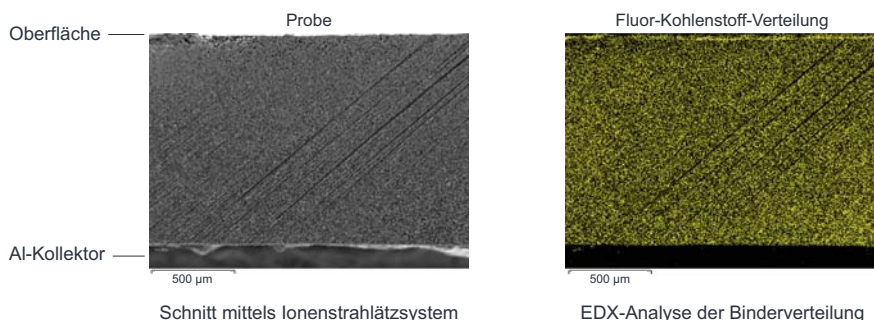


Abbildung 4-19: EDX-Analyse zur Validierung einer homogenen Binderverteilung in der Probe für einen Binderanteil von 2,85 % bei der Verwendung von C65

Zur Sicherstellung, dass es nicht zu den von Haselrieder (2016) beschriebenen Entmischungseffekten bei der Trocknung der dicken Schichten kommt, wurde für die Kathodenbeschichtung mit hohem Binderanteil (2,85%) die Homogenität der Binderverteilung über eine EDX-Analyse nachgewiesen, siehe Abbildung 4-19. Als Indikator diente das chemische Element Fluor als Bestandteil des PVdF Binders.

Der Schnitt durch die Probe wurde über ein Ionenstrahlätzsystem der Fa. Leica präpariert. Die EDX-Analyse zeigt trotz der hohen Trockenfilmdicke von etwa 1,3 mm eine hohe Homogenität hinsichtlich der Verteilung von Aktivmaterial, Leitadditiven und des Binders. Es ist kein Bindergradient zur Oberfläche hin erkennbar.

3. Heraustrennen der Proben

Nach der Trocknung der Bahnen und einwöchiger Lagerung im Trockenraum, wurden Zugproben der Abmessung 100 x 18 mm mittels Skalpell präpariert. Aufgrund der geringen Haftfestigkeit mit dem Substrat konnte die Probe problemlos abgelöst werden. Da für die Prüfung von Elektroden keine allgemeingültige Prüfnorm herangezogen werden kann, mussten eigene Prüfparameter festgelegt werden. Diese lassen sich im Wesentlichen auf die Vorspannkraft und Dehnrate reduzieren, welche für die Versuche auf 0,5 N und 0,1 mm/s festgesetzt wurden (A_Hahn 2020).

Die nachfolgende Tabelle 4-4 gibt eine Übersicht über die Anzahl der Proben, die Teil der Auswertung in Abbildung 4-20 sind. Die unterschiedliche Probenanzahl ergibt sich aus der Anzahl an Zugproben die aus der beschichteten Bahn herausgelöst werden konnten sowie durch den Ausschluss nicht mittig gebrochener Proben im Zugversuch.

Tabelle 4-4: Übersicht über die Anzahl durchgeführter Zugversuche

| Anoden-Proben | | | Kathoden-Proben | | |
|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|-----------|
| Anteile | Leitruß | Anzahl | Anteile | Leitruß | Anzahl |
| 100 / 2 / 2 / 3 | C65 | 7 | 100 / 3 / 2 / 3 | C65 | 8 |
| 100 / 2 / 2 / 2 | C65 | 15 | 100 / 3 / 2 / 2 | C65 | 10 |
| 100 / 2 / 2 / 1 | C65 | 14 | 100 / 3 / 2 / 3 | VGCF | 19 |
| 100 / 2 / 2 / 3 | VGCF | 20 | 100 / 3 / 2 / 2 | VGCF | 9 |
| 100 / 2 / 2 / 2 | VGCF | 16 | | | |
| 100 / 2 / 2 / 1 | VGCF | 11 | | | |

Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf die getrockneten **Aktivmaterialschichten** im **unkalandrierten** Zustand und **ohne Substrat**.

Hinsichtlich der **Anoden-Proben** und unter Verwendung von C65 kann festgehalten werden, dass die Zugfestigkeit bzw. Reißfestigkeit proportional zur Reduktion des Binderanteils abnimmt – vgl. Abbildung 4-20. Eine Verringerung des Binderanteils von 2,85 auf 0,82 % führt zu einer Reduktion der Zugfestigkeit um circa 15 %. Wird als Leitruß VGCF verwendet, sinkt die Zugfestigkeit ebenfalls etwa proportional zur Reduktion des Binderanteils und verringert sich im untersuchten Szenario um circa 20 %.

Hinsichtlich der **Kathoden-Proben** und unter Verwendung von C65 kann festgehalten werden, dass die Zugfestigkeit ebenfalls abnimmt – vgl. Abbildung 4-20. Bei der Reduktion des Binderanteils von 2,78 auf 1,87% sinkt diese um etwa 45%. Bei der Verwendung von VGCF als Leitruß ist der Unterschied mit rund 30 % weniger deutlich.

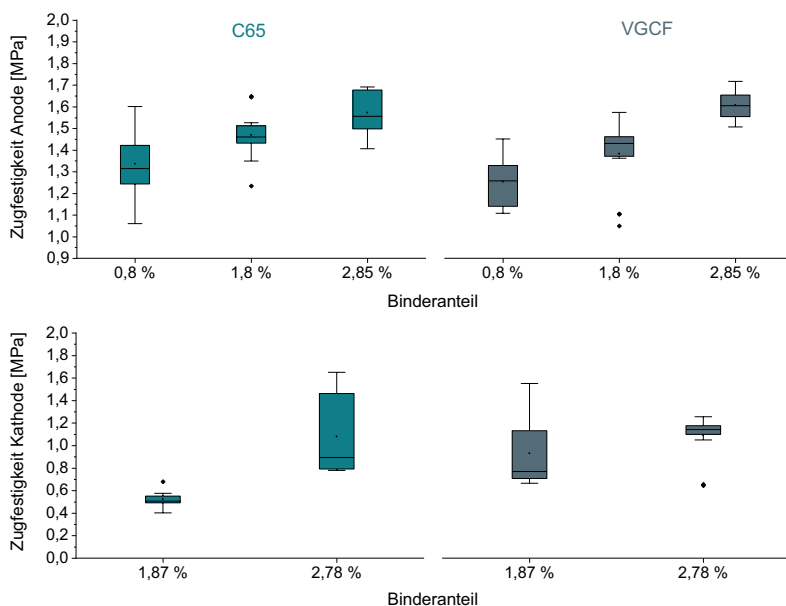


Abbildung 4-20: Einfluss der Variation von Binderanteil und Leitrußstruktur auf die Zugfestigkeit (in Anlehnung an A_Hahn 2020; A_Frech 2020)

Die Versuche verdeutlichen, dass Optimierungsansätze unterschiedliche Implikationen für die jeweilige **Aktivmaterialschicht** (Anode bzw. Kathode) haben. Eine erkennbare Verbesserung der Zugfestigkeit (mech. Eigenschaften) aufgrund der stabförmigen Struktur des VGCF-Leitrüses, vgl. Kapitel 2.2.3, konnte in den Untersuchungen nur für das Kathodenaktivmaterial nachgewiesen werden.

Ein Vergleich der absoluten Werte für die Zugfestigkeit zwischen Anoden- und Kathodenaktivmaterialschichten ist nur bedingt sinnvoll, da die beiden Schichten unterschiedliche Mengen und Arten an Bindemittel enthalten. Untersuchungen von Yim & Choi et al. (2014, S. 114) an 100 µm dicken Binderfilmen haben gezeigt, dass CMC (Carboxymethyl Cellulose) und PVdF (Poly Vinylidene Difluoride) sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen. Die Zugfestigkeit von CMC lag dabei etwa um den Faktor zwei höher als die von PVdF (S. 115). Darüber hinaus erwies sich die PVdF-Schicht als weitaus weniger steif als die CMC Schicht (S. 114).

Im Hinblick auf die getesteten Rezepturen liegt es deshalb nahe, dass die höhere Zugfestigkeit der Anodenaktivmaterialschicht auf die beiden CMC-Binderanteile in der Aktivmaterialbeschichtung zurückzuführen ist. Aufgrund der Empfindlichkeit des PVdF-Binders gegenüber Deformation (Yim & Choi et al. 2014, S. 114), sind in Abbildung 4-21 die Bruchdehnungen für die Kathodenaktivmaterialschichten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Dehnung für einen Binderanteil von 2,78 % für beide Leitrußstrukturen in einem ähnlichen Bereich liegt. Für eine Reduzierung des Binderanteils auf 1,87 % zeigen sich jedoch Unterschiede. Der Einsatz stabförmiger Leitruße könnte folglich insbesondere für Aktivmaterialschichten mit geringem Binderanteil relevant sein.

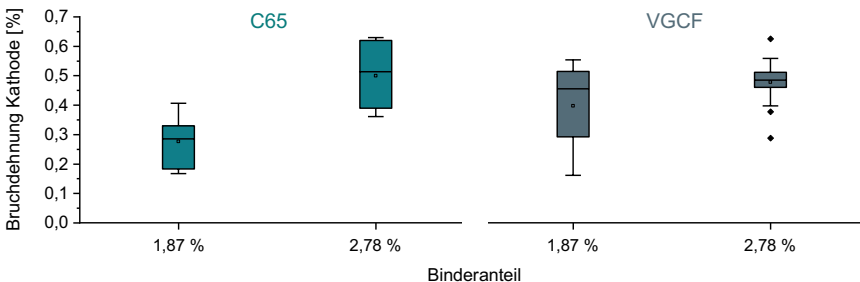


Abbildung 4-21: Einfluss von Binderanteil und Leitrußstruktur auf die Bruchdehnung (in Anlehnung an (A_Frech 2020))

Fazit

In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die materialeitigen Optimierungsansätze hinsichtlich des Bindemittelanteils signifikante Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Aktivmaterialschichten haben. Eine Reduktion des Binderanteils zur Erhöhung des Aktivmaterialanteils in der Beschichtung, führt zu einer erheblichen Reduktion der Zugfestigkeit. Zumindest für die Kathode scheint diese durch

den Einsatz stabförmiger Leitrüß-Strukturen (VGCFs) in Teilen kompensiert werden zu können. Basierend auf den Untersuchungen lässt sich festhalten, dass die Optimierungsansätze unterschiedliche Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Aktivmaterialschichten haben und stark vom Material und Prozess abhängig sind.

F3: Welchen Einfluss hat die Kalandrierung auf die Zugfestigkeit in Abhängigkeit der verwendeten Leitrüßstruktur (C65, VGCF)?

Vor dem Kalandrieren ist die Schicht durch eine hohe Porosität gekennzeichnet und die Verbindungen zwischen den Aktiv- und Inaktivmaterialien sind nur schwach ausgeprägt. Dies führt im Allgemeinen dazu, dass die Schicht unter Zugbeanspruchung leicht bricht. Die Kalandrierung führt zu einer Verdichtung und damit Ausprägung zusätzlicher Partikelkontakte, wodurch die Haftung innerhalb des Materialverbundes verbessert wird. (Gupta & Ücel et al. 2020, S. 858; Zheng & Tan et al. 2012, S. 54–55)

Grundsätzlich wird durch die Kalandrierung von einer Erhöhung des E-Moduls ausgegangen, Zugfestigkeit und Dehnung verhalten sich hingegen materialabhängig (Zheng & Tan et al. 2012, S. 54–55). Prinzipiell wünschenswert ist eine hohe Zugfestigkeit und geringe plastische Verformung, um den weiteren Verarbeitungsschritten standhalten zu können (Zheng & Tan et al. 2012, S. 55; Haselrieder & Ivanov et al. 2013, S. 65).

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden die Dichten mithilfe einer Analysewaage mit Dichte-Kit unter Verwendung einer Hilfsflüssigkeit (Paraffinöl) ermittelt. Die Dichte des Paraffinöls wird herstellerseitig mit 0,845 – 0,890 g/cm³ angegeben, gerechnet wurde mit dem Mittelwert. Zur Bestimmung der Probendichte ρ_P wurde die Formel

$$\rho_P = \frac{m_L}{m_L - m_{HF}} * (\rho_{HF} - \rho_L) + \rho_L \quad 4-3$$

verwendet, mit m_L als Gewicht der Probe in Luft, m_{HF} als Gewicht der Probe in der Hilfsflüssigkeit, ρ_{HF} als Dichte der Hilfsflüssigkeit und ρ_L als Dichte der Luft.

Zur Untersuchung wurden die Proben mit Standardrezeptur (keine reduzierten Binderanteile) herangezogen, jeweils für die verwendeten Leitrüße C65 und VGCF. Die Standardrezeptur mit VGCF wurde unkalandriert vermessen und wies eine Dichte von 2.106 g/cm³ auf, was der errechneten Dichte von 2.1 g/cm³ bei einer Porosität von 50 % entspricht. Die Dichte der Standardrezeptur für C65 wurde experimentell nicht nochmals nachgewiesen und stattdessen der berechnete Wert angegeben, vgl. Tabelle 4-5.

Tabelle 4-5: Übersicht über berechnete und gemessene Dichten

| Kathoden-Proben (Standardrezeptur) | | | | |
|------------------------------------|---------|---------------|--------|-------------|
| Anteile | Leitruß | Zustand | Dichte | |
| 100 / 3 / 2 / 3 | C65 | unkalandriert | 2,1 | (berechnet) |
| 100 / 3 / 2 / 3 | C65 | kalandriert | 3,1 | (gemessen) |
| 100 / 3 / 2 / 3 | VGCF | unkalandriert | 2,1 | (gemessen) |
| 100 / 3 / 2 / 3 | VGCF | kalandriert | 3,0 | (gemessen) |

Aus den Dichtemessungen ergibt sich ein Kalandriergrad von etwa 30 % für die zugrundeliegenden Aktivmaterialschichten. Zheng & Tan et al. (2012, S. 54) berichten, unter der Verwendung eines PVdF Binders und für einen Kalandriergrad von 30 %, von einer Zunahme der Zugfestigkeit um 200 % (von 0,25 MPa auf 0,75 MPa) durch eine Kalandrierung. Die nachstehende Abbildung 4-22 zeigt die eigenen Messungen für die Kathoden-Standardrezeptur aus Tabelle 4-5 mit C65 und VGCF.

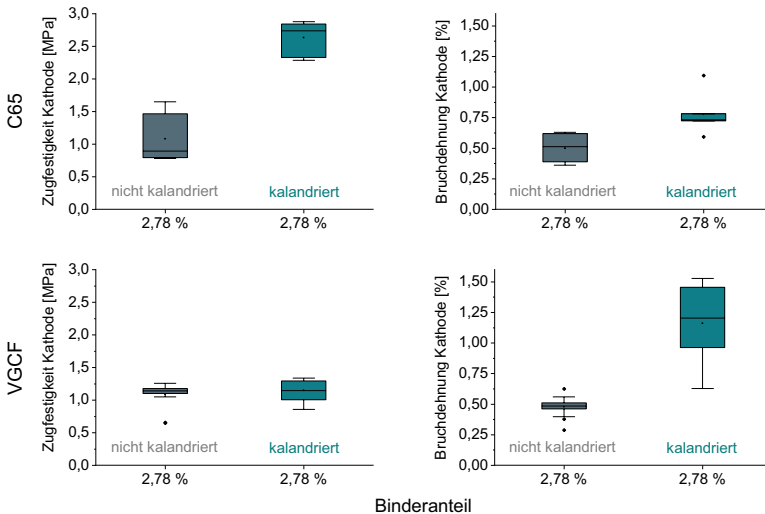


Abbildung 4-22: Max. Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abhängigkeit der Verdichtung und Leitrußstruktur (unkalandrierte Werte in Anlehnung an (A_Hahn 2020))

Die in den Zugversuchen ermittelte Zugfestigkeit für die Standardrezeptur mit C65 stieg von etwa 0,85 MPa auf 2,75 MPa an, was einer Zunahme von ebenfalls etwa 200 % entspricht - vergleichbar mit den Ergebnissen von Zheng & Tan et al.. Die max. Dehnung stieg von etwa 0,5 auf 0,75 % an.

Für die Standardrezeptur mit VGCF konnte durch die Kalandrierung keine Steigerung der Zugfestigkeit festgestellt werden. Diese verharrt trotz der Erhöhung der Proben-dichte auf einem ähnlichen Niveau, jedoch zeigt die Bruchdehnung einen deutlichen Anstieg. Weshalb eine Steigerung der Zugfestigkeit durch die Kalandrierung unter Verwendung von VGCF in Kathodenaktivmaterialschichten ausbleibt, ist literaturseitig nicht bekannt. Aus Untersuchungen zu kalandrierten faserverstärkten (Kohlenstofffasern) Polymer-Verbundwerkstoffen ist bekannt, dass der Einfluss auf die Zugfestigkeit vom eingestellten Kalanderspalt (Kalandriergrad) und der sich einstellenden Faserorientierung bzw. einem etwaigen Faserbruch abhängt (Lukubira & Ogale 2016, S. 7).

Fazit

Unter der Verwendung des Leitrußes C65 ist ein klarer Anstieg der Zugfestigkeit nach der Kalandrierung erkennbar. Diese Beobachtung deckt sich mit den Erkenntnissen in Zheng & Tan et al. (2012, S. 54). Unter Verwendung von VGCF als Leitruß lässt sich dieser Zusammenhang nicht eindeutig bestätigen, da die Zugfestigkeit nach der Kalandrierung in einer ähnlichen Größenordnung verharrt. Die Bruchdehnung liegt vor der Kalandrierung, unabhängig vom verwendeten Leitruß, in etwa derselben Größenordnung. Mit der Kalandrierung nimmt die Bruchdehnung für beide Leitruße zu – unter der Verwendung von VGCF allerdings stärker. Die Optimierungsansätze aus Kapitel 2.2 führen, in Abhängigkeit des Materials (Leitrußstruktur) und der eingestellten Anlagenparameter (Verdichtungsgrad), zu unterschiedlichen Effekten in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften der Aktivmaterialschicht. Der Einfluss des Verdichtungsgrades auf die Zugfestigkeit bei Einsatz von VGCF bleibt im Rahmen dieser Arbeit offen.

F4: Wie verändern die Prozesse im Front-End das Materialbahnverhalten in einem System aus Umlenkwalzen?

Bei der Führung von Bahnmaterial durch Maschinen kann es zu einer Reihe an Herausforderungen kommen, bspw. unerwünschte seitliche Bewegung, Faltenbildung oder Rissbildung (Pfeiffer 1987, S. 2094). Im Rahmen der vorherigen Forschungsfragen wurden die material- und prozessseitigen Einflüsse auf die Biegesteifigkeit und Zugfestigkeit diskutiert. Diese beiden durch das Front-End geprägten Materialkennwerte sind im Hinblick auf etwaige Längsfalten- und Rissbildung für die Materialführung relevant und sollen nachfolgend in Zusammenhang mit weiteren Einflussfaktoren diskutiert werden.

Die **Faltenbildung** spielt in Bezug auf die zu erzielenden Maßhaltigkeiten im Vereinzelungsprozess eine gewichtige Rolle, siehe Kapitel 4.2.2. Die Gründe für deren Entstehung sind vielseitig und sowohl anlagen- als auch materialseitiger Natur (Pfeiffer 1987, S. 2094). Anlagenseitig können bspw. eine nicht-Parallelität und Durchbiegung von Umlenkrollen mögliche Ursachen darstellen (Pfeiffer 1987, S. 2094). Materialseitig induzieren Inhomogenitäten, insbesondere die eingangs erwähnten geometrischen Defekte, Faltenbildung (Hashimoto 2007, S. 941). Im Allgemeinen entstehen Längsfalten dann, wenn einige Bereiche der Materialbahn Zug- und andere Druckspannung unterliegen, bspw. durch Schichtdickenschwankungen oder wie nachfolgend skizziert verkürzte Elektrodenränder (unkalandrierte Randbereiche) (Benson 2002, S. 32). Eine geringe Biegesteifigkeit und die Möglichkeit der Materialbahn sich zur Bahnmitte hin zu bewegen, bspw. durch unzureichenden Kontakt zur Umlenkrolle in der Bahnmitte, induziert und intensiviert die Ausprägung von Längsfalten.

Nachfolgend soll exemplarisch auf den Zustand einer kalandrierten Kathodenbahn vor (Abbildung 4-23, links) und auf einer Umlenkrolle (Abbildung 4-23, rechts) eingegangen werden. Dazu wurde ein 3D-Scan mittels des ATOS Triple Scan Systems der Fa. GOM und eine Druckmessung mittels Druckmessfolie (Prescale® 4LW) der Fa. Fujifilm durchgeführt, siehe Abbildung 4-23.

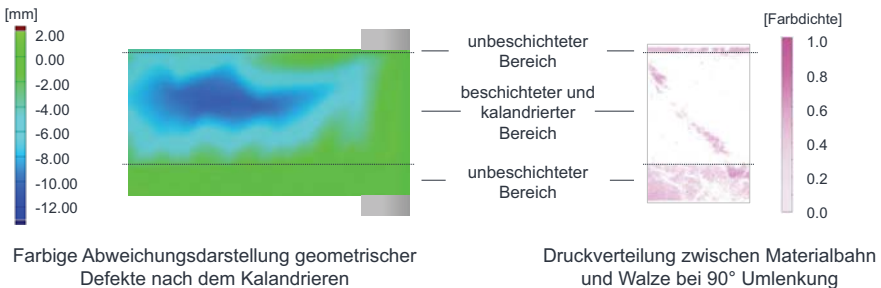


Abbildung 4-23: *Farbige Abweichungsdarstellung in Bildebene (links) und Druckverteilung (rechts) einer kalandrierten Elektrodenbahn in der Materialführung*

Die sich durch die Kalandrierung ergebende plastische Verformung des Stromsammlers im beschichteten Bereich führt zu seitlichen Spannungsüberhöhungen im unbeschichteten Bereich, vgl. Abbildung 4-23. Diese erzeugen eine laterale Kompression zur Mitte hin und führen zu einer schlechten Kontrollierbarkeit und Vorhersage des Bahnverlaufs (Pfeiffer 1987, S. 2094). Eine dünne Materialbahn strebt danach einen

Zustand minimaler Energieeigenschaften anzunehmen und wird Falten in die Richtung ausbilden, in welche die Materialbahn keine Druckspannungen aufnehmen kann – sprich zur Bahnmitte hin (Pfeiffer 1987, S. 2097). Neben der Ausprägung von Längsfalten neigt die Bahn auch zu einem verstärkten „Schüsseln“, was ein Durchhängen in Bahnquerrichtung beschreibt (Lin & Mote 1996, S. 180–181).

Mit der weiteren Bearbeitung im Folgeprozess Längsschneiden, wird der eingangs beschriebene Camber-Effekt induziert. Dieser stellt eine der Hauptursachen für Probleme in der Bahnführung dar (Shelton 1968, S. 19). Wird die Materialbahn geradlinig durch ein System von Umlenkwalzen geführt, kommt es im Randbereich des verkürzten Stromsammlers zu Spannungsüberhöhungen (vgl. Abbildung 4-24), welche zu Faltenbildung und einer Bewegung der Elektrode in Richtung der geringeren Spannung (axiale Richtung) führen kann (Swanson 1999, S. 450; Benson 2002, S. 32). In Weinmann & Fleischer (2019, S. 13) konnte gezeigt werden, dass sich hinter der Umlenkung eine Orientierungsabweichung der Elektrodenbahn einstellt, welche zu einem Genauigkeitsverlust gegenüber der ursprünglichen Ausrichtung führen kann.

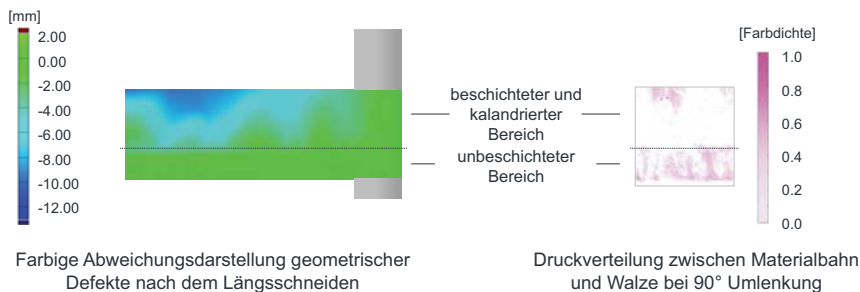


Abbildung 4-24: Farbige Abweichungsdarstellung in Bildebene (links) und Druckverteilung (rechts) einer längsgeschnittenen Elektrodenbahn in der Materialführung

Mit zunehmender Materialbreite und Bahnzugkraft sinkt die Toleranzschwelle durch eine Verstärkung der oben beschriebenen Effekte. Im Gegenzug führt eine Erhöhung der Materialstärke (insb. Beschichtungsdicke) zu einer Reduzierung der Faltenbildung, da die Quersteifigkeit zunimmt. (Hashimoto 2007, S. 940; Pfeiffer 1987, S. 2094)

Rissbildung innerhalb der Aktivmaterialschiicht ist unter allen Umständen zu vermeiden. Für die in Kapitel 2 beschriebenen gängigen Beschichtungsdicken und Kalandriergrade liegt der kritische Radius allerdings weit unterhalb des für die Materialführung

relevanten Bereichs und ist daher eher im Kontext von Wickelprozessen relevant (Schilling & Schmitt et al. 2016, S. 1505). Mit der Erhöhung der Beschichtungsdicke und Verringerung des Binderanteils nimmt der kritische Radius allerdings ab. Hier lassen sich die Implikationen aus den Versuchen zur Zugfestigkeit übertragen.

Fazit

Sowohl Falten- als auch Rissbildung führen zu Qualitätsproblemen in der Fertigung und müssen unter allen Umständen vermieden werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass dabei anlagen- und materialeitige Einflüsse eine Rolle spielen. Insbesondere starke Inhomogenitäten, hohe Bahnzugkräfte und die Verarbeitung breiter Materialbahnen stellen entscheidende Faktoren bei der Längsfaltenentstehung dar.

Zusammenfassung Materialführung

Hinsichtlich der Biegesteifigkeit ist zu beobachten, dass sich diese für Anoden- und Kathoden mit der Kalandrierung gegenläufig entwickelt. Eine Reduktion des Binderanteils hat einen großen Einfluss auf die Reißfestigkeit der Aktivmaterialschiicht, kann aber ggf. durch den Einsatz stabförmiger Leitruße kompensiert werden. Sowohl Längsfalten- als auch Rissbildung führen zu Qualitätsproblemen und müssen deshalb stets vermieden werden. Allgemein zeigt sich, dass die eingangs beschriebenen Optimierungsansätze (Kapitel 2) zu Qualitätsproblemen in der Produktion führen können.

4.2.2 Vereinzelnung

In diesem Kapitel wird auf den Einfluss von Kalandrierung und Bahnzugkraft auf die Elektrodenblattmaßhaltigkeit in der Vereinzelnung eingegangen. Darüber hinaus wird der Einfluss der Prozessschritte aus dem Front-End auf die geometrische Form der Elektrodenbahn analysiert. Schnittkantenuntersuchungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher thematisiert, da diese bereits ausführlich in anderen Veröffentlichungen (Jansen & Kandula et al. 2020; Pflöging 2017; Krieglner & Binzer et al. 2020) behandelt wurden. Zur Erörterung der Einflüsse werden auch für die Vereinzelnung drei Forschungsfragen formuliert und beantwortet.

Beschreibung der Vorgehensweise

Die Versuchsdurchführung bestand im Wesentlichen aus drei Schritten. Im ersten Schritt wurde die Materialbahn mithilfe einer Trägerplatte in das Stanzwerkzeug eingebracht und an den beiden Einspannungen fixiert. Anschließend wurde über *Einspannung 2* mittels Proportionalregelventil und Pneumatikzylinder eine Bahnzugkraft aufgebracht, welche über die Messwalze präzise erfasst und eingeregelt werden konnte. Im letzten Schritt erfolgten der Stanzvorgang im Vollschnitt und die Ablage des Elektroden Einzelblattes auf der Stapelstation. (Weinmann & Lang et al. 2018, S. 521–522)

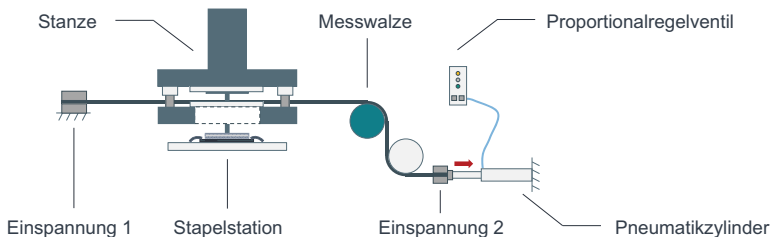


Abbildung 4-25: Versuchsaufbau zur Analyse der Effekte bei der Vereinzelung

Da es sich bei dem Aufbau zur Versuchsdurchführung um eine Erweiterung des hochpräzisen „Cut-and-Place“ Moduls handelt (Baumeister & Fleischer 2014, S. 8), können Effekte im Hinblick auf Nennmaßabweichungen im Wesentlichen auf den Zustand der Materialbahn in der freien Bahnlänge im Stanzwerkzeug zurückgeführt werden.

F5: Welchen Einfluss haben Kalandrierung und Bahnzugkraft auf die resultierende Elektrodenblattmaßhaltigkeit in der Vereinzelung?

Die folgenden Ergebnisse basieren auf der Vermessung von 192 gestanzten Anoden- und Kathodeneinzelblättern, welche im Rahmen der angeleiteten Arbeit von A_Lin (2019) hergestellt wurden. Die Messungen erfolgten optisch und automatisiert auf einem Zeiss O-Inspect. Um anlagenseitige Einflüsse weitestgehend minimieren zu können, wurden die Stanzungen auf dem identischen Anlagenmodul (Kathodenmodul) durchgeführt. Aufgrund des hohen Materialbedarfs wurden kommerzielle Elektrodenbahnen verwendet. Die unkalandrierte Dicke der Elektrodenbahnen betrug 153 µm für die Kathoden- und 150 µm für die Anodenbahn, analog zu den Ausgangsmaterialien in Kapitel 4.2.1. Die kalandrierte Dicke wurde auf jeweils 120 µm eingestellt, was einem Kalandriergrad von 22 % (Kathode) bzw. 20 % (Anode) entspricht.

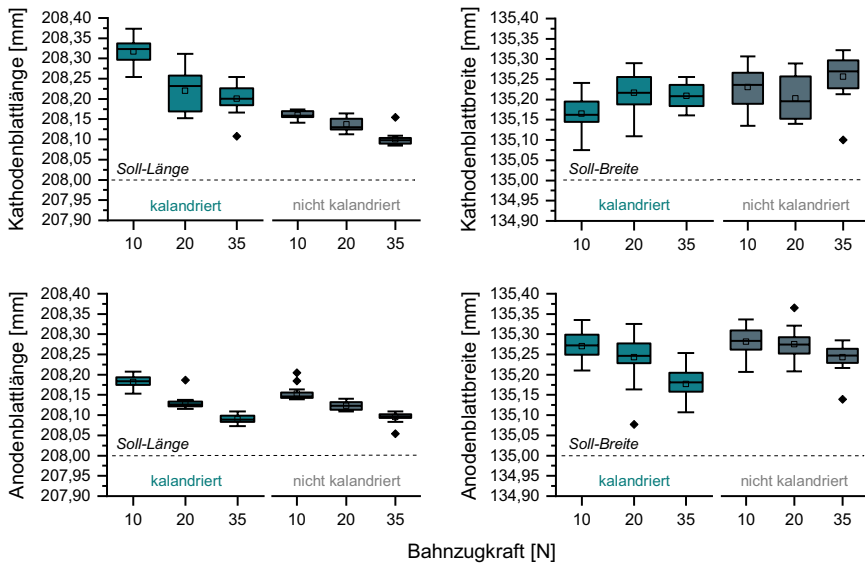


Abbildung 4-26: Einzelblattabmessungen in Abhängigkeit des Bahnzuges und Materials (in Anlehnung an (A_Lin 2019))

In Bezug auf die **Kathodenbahnen und Elektrodenblattlängen** (Abb. 4-26, oben links) wird deutlich, dass eine höhere Bahnzugkraft, sowohl für kalandrierte als auch unkalandrierte Materialbahnen zu einer Reduzierung der Elektrodenblattlänge und Annäherung an die Soll-Länge (208 mm) führt. Dies ist im Wesentlichen auf das Spannen des Materials im Stanzwerkzeug und – zu geringen Teilen – auch auf die elastische Verformung der Materialbahn in Zugrichtung zurückzuführen. Darüber hinaus wird deutlich, dass kalandrierte Kathodenblätter eine größere Abweichung gegenüber der Soll-Länge aufweisen als nicht kalandrierte Kathodenblätter. Dies liegt in der Welligkeit des kalandrierten Materials in Bahn längsrichtung begründet, vgl. Kapitel 2.4.2.3, welche auch über eine Erhöhung des Bahnzuges nicht hinreichend reduziert werden kann. Bezüglich der **Kathodenbahnen und Elektrodenblattbreiten** (Abb. 4-26, oben rechts) lässt sich kein augenfälliger Trend ableiten. Das Material hängt im Stanzwerkzeug in Bahnlauf- und Bahnquerrichtung durch, da sich die Masse der Materialbahn zur Bahnmitte hin konzentriert (unbeschichtete Ränder). Eine Erhöhung der Bahnzugkraft spannt die Materialbahn global, wodurch sich die Maßhaltigkeit des Elektrodenblattes in Bahnlauf- (Blattlänge) und Bahnquerrichtung (Blattbreite) eigentlich verbessern

sollte. Bei stark kalandrierten Elektrodenbahnen kann es aufgrund der plastischen Verformung des beschichteten Bereichs jedoch dazu kommen, dass sich die Bahnzugkraft vermehrt im unbeschichteten Randbereich abstützt und den kalandrierten Bereich nicht Spannen kann. Dies kann zudem ein Einschnüren der Materialbahn hervorrufen und dem positiven Effekt des Spannens entgegenwirken.

Hinsichtlich der **Anodenbahnen und Elektrodenblattlängen** (Abb. 4-26, unten links) ist festzustellen, dass durch eine Erhöhung der Bahnzugkraft die Elektrodenblattlänge ebenfalls abnimmt. Da der Graphit und die Kupferfolie verhältnismäßig weich sind und die Aktivmaterialteilchen zum Abgleiten neigen, sind bei der Kalandrierung geringere Kräfte notwendig und somit entstehen geringere plastische Verformungen (geringere Welligkeit) im Material. Dies führt dazu, dass sich die Abmessungen der kalandrierten und unkalandrierten Anodenblätter in einer ähnlichen Größenordnung bewegen. Die **Anodenbahnen und Elektrodenblattbreiten** betreffend (Abb. 4-26, unten rechts) führt eine Erhöhung der Bahnzugkraft sowohl für die kalandrierte als auch unkalandrierte Elektrodenbahn zu einer Verringerung der Elektrodenblattbreite und Annäherung an die Soll-Breite (135 mm).

Wie in Weinmann & Lang et al. (2018, S. 523–524) gezeigt, spielt die Ausprägung von Längsfalten eine wichtige Rolle in Bezug auf die Maßhaltigkeit in Bahnquerrichtung (entspricht hier Blattbreite). Längsfalten können durch Inhomogenitäten sowie ungleichmäßige Druckverteilungen (dicke Beschichtung, Spannungsüberhöhung am Rand) zwischen Materialbahn und Umlenkrolle induziert werden, wobei eine Erhöhung der Bahnzugkraft zu einer Verstärkung der Längsfaltenausprägung führen kann.

Fazit

In Bezug auf die **Blattlänge** kann festgehalten werden, dass eine Erhöhung der Bahnzugkraft zu einer Reduzierung der Blattlänge führt, unabhängig vom Material (Anode, Kathode) und Bearbeitungszustand (kalandriert, unkalandriert). Kalandrierte Materialien weisen bei identischen Bahnzugkräften höhere Blattlängen auf als unkalandrierte Materialien – insbesondere Kathoden aufgrund der ausgeprägteren geometrischen Defekte. Hinsichtlich der **Blattbreite** ist der Einfluss des Bahnzuges uneindeutig. Dies liegt darin begründet, dass es zu einer Überlagerung von Effekten kommt. Für die Anodenbahn ist eine Reduzierung der Blattbreite bei höheren Bahnzügen zu beobachten, so-

fern die Druckverteilung homogen ist. In allen Versuchen wich die gemessene Blattlänge und -breite um ca. 0,1 bis 0,3 mm vom Nennmaß ab. Dies liegt an den geometrischen Defekten (Wellen, Falten) sowie der teils mangelnden Fähigkeit die Elektrodenbahn im Prozess homogen zu Spannen. Folglich sollte die Werkzeugauslegung stets in Abhängigkeit des Materialverhaltens erfolgen, um Abweichungen vorzubeugen.

F6: Welchen Einfluss haben Kalandrierung und Bahnzugkraft auf die Blattlängen- und Blattbreitenschwankungen beim Vereinzeln?

Die folgenden Auswertungen basieren ebenfalls auf den Messungen von A_Lin (2019) und veranschaulichen die arithmetischen Toleranzen innerhalb der jeweiligen Versuchsreihen. Es handelt sich hierbei um die Schwankungsbreite und nicht die Abweichung vom Nennmaß – diese wurde im vorherigen Abschnitt diskutiert.

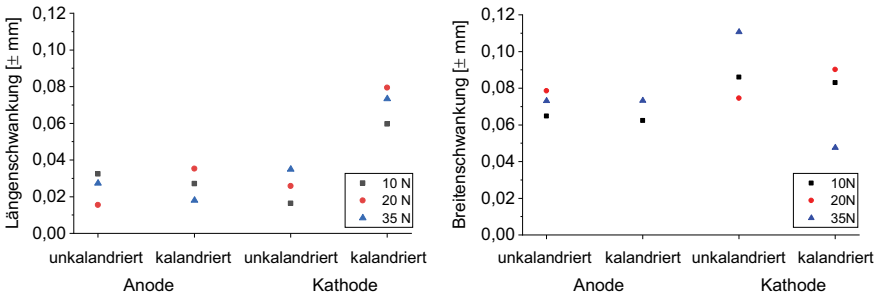


Abbildung 4-27: Blattlängenschwankungen (links) und Blattbreitenschwankungen (rechts) in Abhängigkeit der Bahnzugkraft und des Materials

Bezogen auf die **Blattlängenschwankung**, Abbildung 4-27 links, zeigt sich, dass diese mit kleiner $\pm 0,04$ mm für die unkalandrierte und kalandrierte Anode sowie für die unkalandrierte Kathode verhältnismäßig gering ausfällt. Darüber hinaus wird deutlich, dass der eingestellte Bahnzug auf die Schwankungsbreite selbst keinen signifikanten Einfluss hat – nicht zu verwechseln mit der Nennmaßabweichung. Die kalandrierte Kathode hingegen weist etwa eine doppelt so hohe Toleranz auf, welche u.a. in den stochastisch auftretenden geometrischen Defekten (Welligkeit) begründet liegt.

Im Hinblick auf die **Blattbreitenschwankung**, Abbildung 4-27 rechts, ist erkennbar, dass die arithmetische Toleranz insgesamt um den Faktor zwei bis drei über jener der

Blattlängenschwankung liegt. Die Bahnzugkraft scheint auch in Bezug auf die Blattbreitenschwankung keinen eindeutigen Einfluss zu haben. Darüber hinaus ist die Streuung zwischen den unterschiedlichen Bahnzügen höher.

Fazit

Die Auswertungen zeigen, dass insbesondere bei kalandrierten Kathoden mit hohen Toleranzen beim Blattlängenzuschnitt zu rechnen ist. Die Blattbreitenschwankungen fallen, abgesehen von der unkalandrierten Anode, deutlich höher aus als die Blattlängenschwankungen. Basierend auf den gewählten Materialien und Anlagenparametern, lässt sich die arithmetische Toleranz auf bis zu $\pm 0,08$ mm für die Blattlänge und auf bis zu $\pm 0,125$ mm für die Blattbreite beziffern. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da die Schwankungsbreite des Zuschnittes das untere Limit der zu erreichenden Stapelgenauigkeit beschreibt – je genauer der Zuschnitt, desto höher die mögliche Genauigkeit. Es wird deutlich, dass die Schwankungsbreite und damit auch **Stapelgenauigkeit vom Material** (Anode, Kathode), dem **Verarbeitungszustand** (kalandriert, unkalandriert) und **der Betrachtungsrichtung** (Bahn längs- und Bahnquerrichtung) **abhängt** und nicht material-, parameter- und richtungsunabhängig angegeben werden kann.

F7: Welchen Einfluss haben die Prozessschritte im Front-End (Kalandrieren, Längsschneiden und Notching) auf die geometrische Form einer Elektrodenbahn?

Die vorangehenden Analysen zur Vereinzelung haben gezeigt, dass die Nennmaßabweichungen sowie die Blattlängen- und Blattbreitenschwankungen stark materialabhängig sind. Dabei konnte ein Zusammenhang zwischen den geometrischen Defekten und der Genauigkeit aufgezeigt werden. Da die Vereinzelung des Elektrodenblattes in der Serienfertigung über mehrere Prozessschritte hin erfolgt, vgl. Kapitel 2, wird nachfolgend auf die geometrischen Eigenschaften der Materialbahn nach den Bearbeitungsschritten Kalandrieren, Längsschneiden und Notching eingegangen.

Die nachstehende Abbildung 4-28 zeigt mehrere Abweichungsdarstellungen (in Bildebene) ein und desselben Bahnabschnitts einer stark kalandrierten Kathodenbahn in verschiedenen Bearbeitungszuständen und unter identischem Bahnzug (N/mm). Verwendet wurde ebenfalls das eingangs beschriebene kommerzielle Material, welches auf $112 \mu\text{m}$ (Kalandriergrad 27%) verdichtet wurde.

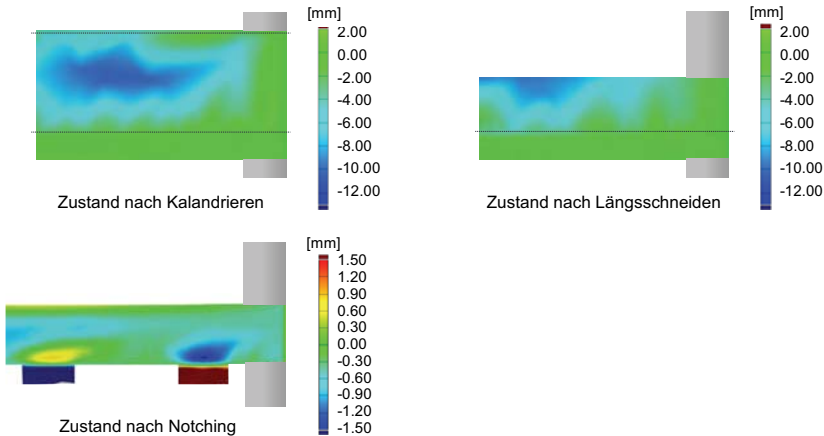


Abbildung 4-28: Zustand der Kathodenbahn nach verschiedenen Bearbeitungsschritten der Zellproduktion (Abweichungsdarstellung in Bildebene)

Abbildung 4-28 verdeutlicht, dass die geometrischen Defekte unmittelbar nach der Kalandrierung am größten sind. Diese treten primär in Form von Welligkeit in der gelängten Aktivmaterialfläche auf. Während sich die Defekte (Welligkeit) in Bahnlängsrichtung prozesstechnisch (z.B. über Bahnzugkraft) kaum beeinflussen lassen, ist eine Beeinflussung in Bahnquerrichtung durch spezielle Komponenten (z.B. Breitstreckwalzen) möglich. Dies ermöglicht eine optimale Ausgangssituation für das Längsschneiden. Längsschneiden wiederum ändert, aufgrund des Camber-Effektes, den Bahnzustand erneut, vgl. Abbildung 4-28 rechts. Dieser kann nun über Systeme zur Spannungsharmonisierung (vgl. Kapitel 2) kontrolliert werden. Da mit dem Notching große Teile des verkürzten Randbereichs vom Elektrodenband entfernt werden, konzentrieren sich die geometrischen Defekte nun auf den Bereich um das Ableiterföhnchen, sodass ein Ablängen zu diesem Zeitpunkt mit einer verbesserten Maßhaltigkeit erfolgen kann.

Fazit

Der **Materialzustand** und die **Prozessreihenfolge** spielen **eine wichtige Rolle** bei der Vereinzelung. Nennmaßabweichungen und Blattlängenschwankungen können über **eine optimierte Bearbeitungsreihenfolge** reduziert werden, die es erlaubt, die qualitätskritischen Produktkenngößen (z.B. Bahnbreite bzw. Blattbreite) durch entsprechende Prozessparameter oder Komponenten (z.B. Breitstreckwalze) zu beeinflussen.

Zusammenfassung Vereinzeln

Die Messungen haben gezeigt, dass die Blattlängen und -breiten allesamt positiv vom Nennmaß abweichen. Das Maß in Bahnlaufrichtung (Blattlänge) lässt sich über die Bahnzugkraft aktiv beeinflussen, wohingegen die Wirkung in Bahnquerrichtung durch die Überlagerung von Effekten nicht genau bestimmt ist. Für die untersuchten Materialien zeigte sich zudem, dass die Nennmaßabweichungen und Schwankungsbreiten für Materialien, die mit geometrischen Defekten behaftet sind, tendenziell zunehmen. Die **Schwankungsbreite** ist im Kontext der Stapelbildung besonders relevant, da diese das **untere Limit der Stapelgenauigkeit** definiert.

4.2.3 Handhabung

In diesem Kapitel soll der Einfluss verschiedener Greiferanstellwinkel, Differenzdrücke, Materialien und Lochgrößen an Niederdruckflächensaugern auf die maximale Haltekraft unter Scherbeanspruchung bzw. Schälbeanspruchung untersucht werden. Analog zu den vorherigen Unterkapiteln werden drei Forschungsfragen formuliert und erörtert.

Beschreibung des Versuchsaufbaus

Der Niederdruckflächensauger im Versuchsaufbau, vgl. Abbildung 4-29, konnte über zwei Drehteller präzise gegenüber der Einspannung angestellt werden. Die im Flächensauger befindliche Kunststoffplatte mit der Lochmustergeometrie konnte gegen andere Platten unterschiedlicher Lochdurchmesser getauscht werden, wobei die Gesamtlochfläche mit 113,1 mm² auf einer Wirkfläche von 15 cm² stets unverändert blieb. Der Differenzdruck wurde über einen Vakuumejektor erzeugt und über einen Differenzdrucksensor im Flächengreifer erfasst.

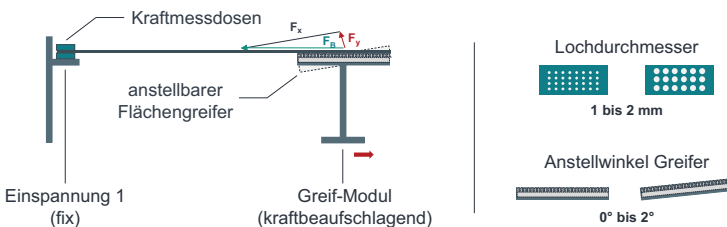


Abbildung 4-29: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Handhabungseinflüssen

Das Vorgehen zur Untersuchung von Effekten bzgl. des Niederdruckflächensaugers gliedert sich in drei wesentliche Schritte. Im ersten Schritt wurde das Material auf eine Trägerplatte gelegt und in der *Einspannung 1* fixiert. Anschließend wurde das Material in der entsprechenden Konfiguration (Differenzdruck, Anstellwinkel, Lochmuster) angesaugt. Zur Versuchsdurchführung wurde das Greif-Modul mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,1 mm/s entgegen der Einspannung verfahren und dabei der Kraft-Weg-Verlauf über die installierten Kraftmessdosen in der *Einspannung 1* sowie den verbauten Glasmaßstab aufgezeichnet, um daraus die maximale Haltekraft zu ermitteln.

Für die Übertragung von Tangentialkräften F_T gilt

$$F_T = \Delta p * A_{eff} * \mu \quad 4-4$$

mit Δp für den Differenzdruck, A_{eff} für die effektive Saugfläche und μ für den Reibwert (Götz 1991, S. 56). Die effektive Saugfläche beschreibt die Fläche auf die „der Unterdruck des Greifers wirkt“ und hängt u.a. von der Steifigkeit des Materials, dessen Porosität und Gesamtdruckverlusten ab (Götz 1991, S. 61–62). Der Rauheits- und damit Reibwert hängt zudem vom Kalandriergrad ab (Schilling & Schmitt et al. 2016, S. 1504).

Da sich der Reibwert auch mit der Verschmutzung des Greifers ändert, wurde dessen Oberfläche vor der Versuchsdurchführung mittels Isopropanol gereinigt und anschließend gezielt rekontaminiert. Dazu wurden jeweils drei der zu testenden Proben vom Greifer abgeschert um diesen entsprechend zu präparieren.

Die Versuchsdurchführungen zu den nachfolgenden drei Forschungsfragen wurden im Rahmen der angeleiteten Arbeit von A_Karl (2018) durchgeführt. Ausgangsbasis für die Untersuchungen waren abermals die kommerziellen Elektrodenbahnen, vgl. Kapitel 4.2.1, welche im kalandrierten Zustand (Dicke ~ 120 μm) vorlagen.

F8: Welchen Einfluss haben der Differenzdruck und Greifer-Anstellwinkel auf die maximale Haltekraft unter Scherbeanspruchung bzw. Scher-/Schälbeanspruchung?

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht den Einfluss des anliegenden Differenzdrucks und Greifer-Anstellwinkels auf die maximal erzielbaren Haltekräfte am Beispiel einer Anodenbahn. Die Kraft ist angegeben für eine Wirkfläche von 1 cm^2 und kann über eine Multiplikation auf größere Wirkflächen extrapoliert werden. Der Lochdurchmesser in diesem Versuch belief sich auf 2 mm.

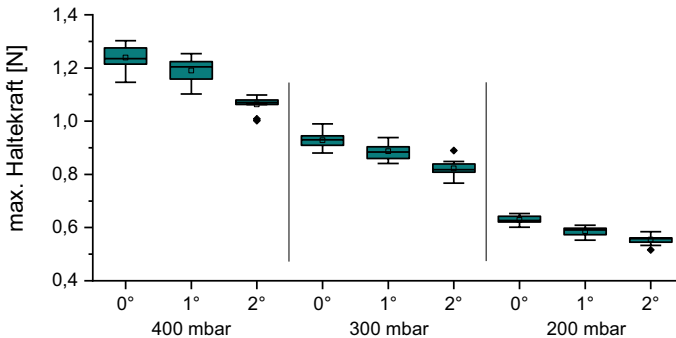


Abbildung 4-30: Untersuchung der max. Haltekraft einer Anodenbahn bei drei Differenzdrücken und Greifer-Anstellwinkeln (in Anlehnung an (A_Karl 2018))

In Bezug auf die **Differenzdrücke** zeigt sich, dass die Haltekraft proportional mit der Reduzierung des Differenzdrucks fällt. Für geringere Differenzdrücke kommt es außerdem zu einer geringeren Streuung der Messergebnisse. Aus der Perspektive einer materialschonenden Verarbeitung, sollten die Kräfte respektive Differenzdrücke stets möglichst niedrig gewählt werden (Fleischer & Ruprecht et al. 2012, S. 353–354).

In Bezug auf die **Greifer-Anstellwinkel** zeigt sich, dass bereits geringe Winkel zu Abschäleffekten und einem Haltekraftverlust führen. Je größer der anliegende Differenzdruck, desto höher der Haltekraftverlust pro eingestelltem Grad Neigung.

Der identische Versuch wurde ebenfalls für eine Kathodenbahn sowie reine Aluminium- und Kupferfolien durchgeführt. Prinzipiell gelten die oben beschriebenen Zusammenhänge für alle getesteten Materialien, leichte Unterschiede bestehen jedoch in der max. Haltekraft sowie im Haltekraftverlust bei angestelltem Greifer, vgl. Tabelle 4-6.

Tabelle 4-6: Zusammenfassung der Ergebnisse für unterschiedliche Materialien und Anstellwinkel bei 400 mbar Differenzdruck (in Anlehnung an (A_Karl 2018))

| Winkel | Anode | | Kathode | | Kupferfolie | | Aluminiumfolie | |
|--------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|----------------|--------------------------------|
| 0° | 1,239 | | 1,229 | | 1,576 | | 1,348 | <i>M</i> [N/cm ²] |
| | 0,049 | | 0,040 | | 0,042 | | 0,032 | <i>SD</i> [N/cm ²] |
| 1° | 1,190 | -4% | 1,135 | -8% | 1,322 | -16% | 1,210 | -10% |
| | 0,046 | | 0,022 | | 0,048 | | 0,025 | <i>SD</i> [N/cm ²] |
| 2° | 1,061 | -14% | 1,039 | -16% | 1,084 | -31% | 1,096 | -19% |
| | 0,032 | | 0,032 | | 0,024 | | 0,029 | <i>SD</i> [N/cm ²] |

prozentuale Änderung ggü. Referenz (Winkel = 0°) / *M* = Mittelwert / *SD* = Standardabweichung

Gegenüber den Elektrodenbahnen zeigt sich, dass der Haltekraftverlust bei dünnen Folien signifikanter ist als bei beschichteten Materialien – die prozentuale Änderung bezieht sich auf die jeweilige Messung bei 0° Anstellwinkel. Begründet liegt dies in der geringeren Biegesteifigkeit der Folien, da sich das Material dadurch leichter abschält und die Lochreihe so schneller partiell freigibt (Götz 1992, S. 67–68). Bei Materialien höherer Steifigkeit hingegen, wirkt die Saugkraft innerhalb des Greiferrandes stabilisierend auf die Störkraft (Götz 1991, S. 69).

F10: Welchen Einfluss haben der Lochdurchmesser des Vakuumflächengreifers und das zu handhabende Material auf die maximale Haltekraft unter Scherbeanspruchung?

In diesem Abschnitt wird der Einfluss unterschiedlicher Lochdurchmesser bei gleichbleibender Gesamtlochfläche ($113,1 \text{ mm}^2$) und Wirkfläche (15 cm^2) sowie einem Anstellwinkel von 0° untersucht, siehe Tabelle 4-7.

Tabelle 4-7: Übersicht über die Versuchskonfiguration (nach (A_Karl 2018))

| Bezeichnung | Greifer-Konfiguration | | | |
|-------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| | Durchmesser | Lochanzahl | Gesamtfläche (Löcher) | Gesamtumfang (Löcher) |
| D = 2 | 2,0 mm | 36 | $113,1 \text{ mm}^2$ | 226,2 mm |
| D = 1,5 | 1,5 mm | 64 | $113,1 \text{ mm}^2$ | 301,59 mm |
| D = 1 | 1,0 mm | 144 | $113,1 \text{ mm}^2$ | 452,39 mm |

Wie in der nachstehenden Abbildung 4-30 ersichtlich, steigt die maximale Haltekraft mit der Verringerung des Lochdurchmessers in Bezug auf die in Tabelle 4-7 gewählten Durchmesser. Eine weitere Beobachtung ist, dass sich die maximale Haltekraft mit der Änderung des Lochdurchmessers stark materialabhängig entwickelt. Während die Auswertung im vorherigen Abschnitt suggerierte, dass sich für die beiden Folien und die Anodenbahn höhere Haltekräfte erzielen lassen, ändert sich dieses Bild mit der Veränderung des Lochdurchmessers grundlegend.

Gemäß den Ausführungen von Hesse (2011, S. 10) unterliegen Niederdruckflächen-sauger dem Wirkprinzip "Halten durch Kraftschluss". Für biegeschlaife Materialien treten weitere Effekte wie Beulenbildung und somit Formschluss auf (Götz 1992, S. 34). Diese entwickelt sich, gemäß der Untersuchungen von Reinhart & Straßer, quadratisch mit dem Anstieg des Lochdurchmessers (2011, S. 304–305). Da die Gesamtlochfläche

konstant gehalten wurde und die Beulenbildung gemäß den Erläuterungen von Reinhart & Straßer abnimmt, müssen weitere Effekte bei der Querbeanspruchung eine Rolle spielen. Diese könnten bspw. in Scherkräften an den Lochrändern begründet liegen, da der Gesamtumfang mit der Reduzierung des Lochdurchmessers zunimmt – vgl. Tabelle 4-7 rechte Spalte. Weitere Effekte können in der Änderung des Verhältnisses zwischen der Fläche des Greifers und wirksamer Saugfläche ($A_{\text{eff}}/A_{\text{Ges}}$) begründet liegen.

Tabelle 4-8: Zusammenfassung der Ergebnisse für unterschiedliche Materialien und Lochdurchmesser bei 400 mbar Differenzdruck (in Anlehnung an (A_Karl 2018))

| Durchmesser | Anode | Kathode | Kupferfolie | Aluminiumfolie | |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| 2,0 mm | 1,239 | 1,229 | 1,576 | 1,348 | M [N/cm ²] |
| | 0,049 | 0,040 | 0,042 | 0,032 | SD [N/cm ²] |
| 1,5 mm | 1,471 +19% | 1,783 +45% | 1,799 +14% | 1,631 +21% | M [N/cm ²] |
| | 0,049 | 0,054 | 0,063 | 0,038 | SD [N/cm ²] |
| 1,0 mm | 1,485 +20% | 1,926 +57% | 1,970 +25% | 1,699 +26% | M [N/cm ²] |
| | 0,061 | 0,055 | 0,070 | 0,045 | SD [N/cm ²] |

prozentuale Änderung ggü. Referenz (Durchmesser = 2 mm) / M = Mittelwert / SD = Standardabweichung

Auf der anderen Seite kann der Lochdurchmesser nicht beliebig klein gewählt werden, da der Strömungswiderstand sonst immer weiter ansteigt und es zum Druckverlust und letztlich zu einer Abnahme der Haltekraft kommt (Reinhart & Straßer 2011, S. 305). Die Angabe zur maximalen Haltekraft in Abbildung 4-31 bezieht sich ebenfalls auf eine Wirkfläche von 1 cm².

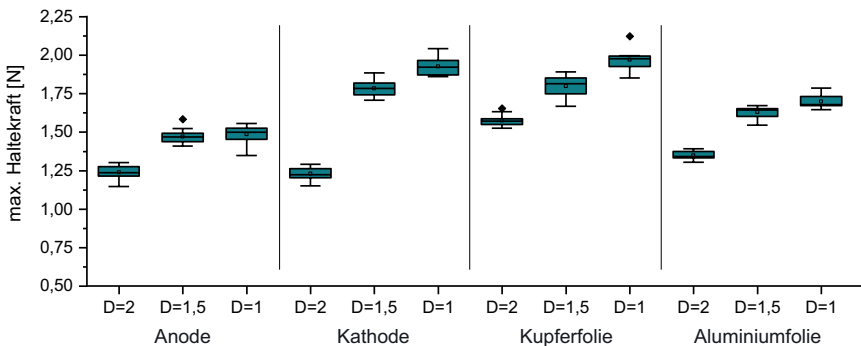


Abbildung 4-31: Max. Haltekraft verschiedener Materialien bei unterschiedlichen Lochdurchmessern und 400 mbar Differenzdruck (in Anlehnung an (A_Karl 2018))

Da die Beulenbildung von der Biegesteifigkeit und diese wiederum von der Materialdicke und dem Kalandriergrad abhängt, vgl. Kapitel 4.2.1, ist der **optimale Lochdurchmesser** stets **materialabhängig** zu bestimmen. Dabei scheint vor allem eine Differenzierung zwischen dem Material (Anode, Kathode), der Beschichtungsdicke sowie dem Verarbeitungszustand (kalandriert, nicht kalandriert) sinnvoll.

Darüber hinaus hat sich in den Versuchen gezeigt, dass mit der Verringerung des Lochdurchmessers das Risiko für Beschädigungen sinkt.

Fazit Niederdruckflächensauger

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits kleine Winkel zu Abschälereffekten und Haltekraftverlusten führen können, wobei der prozentuale Haltekraftverlust mit geringem Differenzdruck sinkt bzw. mit geringerer Biegesteifigkeit steigt. Darüber hinaus erweist sich der Lochdurchmesser bei identischer Gesamtlochfläche als wichtiger Faktor. Für die untersuchten Durchmesser steigt die maximale Haltekraft mit der Verringerung des Lochdurchmessers an, wobei sich die Entwicklung stark materialabhängig zeigt.

F11: Welchen Einfluss hat die Kalandrierung auf den Greifvorgang mittels Vakuumpflächengreifer?

Im Rahmen der vorherigen beiden Forschungsfragen wurde die Handhabung des Materials unter Scher- bzw. Schälbeanspruchung entgegen einer wirkenden Bahnzugkraft untersucht. Nun soll die Aufnahme eines stark kalandrierten Kathodenblattes mittels vollflächigem Niederdruckflächensauger ohne wirkenden Bahnzug betrachtet werden. Aufgrund der Kalandrierung und der dadurch entstehenden geometrischen Defekte, vgl. Abbildung 4-32, kann es dabei zu unerwünschten Wechselwirkungen kommen. Nachfolgend sollen diese für ausgewählte Aspekte untersucht und erörtert werden.

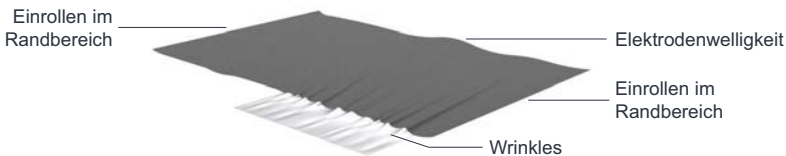


Abbildung 4-32: Illustration möglicher geometrischer Defekte eines stark kalandrierten Elektrodenblattes

Grundlegend gilt, dass geometrische Defekte bspw. bei der kontaktlosen Aufnahme oder dem Ansaugen des Elektrodenblattes über einen Vakuumentisch zu inhomogenen Abständen zwischen Elektrodenblatt und Greifer führen. Es gilt, dass der wirkende Unterdruck beim Ansaugvorgang von der Distanz abhängig ist, wobei die Anströmgeschwindigkeit mit der dritten Potenz abfällt und sich der dynamische Unterdruck mit der zweiten Potenz zur Strömungsgeschwindigkeit entwickelt (Götz 1991, S. 80). Diese Ungleichmäßigkeiten führen zu unterschiedlichen Druckfeldern zwischen Elektrodenblatt und Greifer (Götz 1991, S. 82). Für den Differenzdruck Δp gilt näherungsweise

$$\Delta p \sim c * \left(\frac{\dot{V}}{A} \right)^2 \quad 4-5$$

mit c als Konstante, \dot{V} für den Volumenstrom und A für die Greiffläche (Götz 1991, S. 80). Für die sich ergebende Haltekraft am vollflächigen Niederdruckflächensauger, welche als gleichmäßig verteilte Normalkraft F_N aufgebracht wird, gilt

$$F_N = \Delta p * A_{eff} \quad 4-6$$

mit Δp als Differenzdruck und A_{eff} für die effektive Saugfläche (Götz 1991, S. 22; 56). Wie im Grundlagenteil beschrieben, ist bei der Verwendung teilflächiger Greifer eine Erhöhung des Unterdrucks notwendig, um die notwendige Haltekraft zu erreichen. Für den erhöhten Differenzdruck Δp_0 gilt

$$\Delta p_0 = m_A * g * S * \left(\frac{l_{\ddot{U}}}{l_G} + 1 \right)^2 \quad 4-7$$

mit m_A für die Flächenmasse [gk/m²], g für die Erdbeschleunigung, S für den Sicherheitszuschlag, $l_{\ddot{U}}$ für die Länge des Überstandes und l_G für die Länge der Greiferfläche (Götz 1991, S. 59).

Die nachstehende Abbildung 4-33 zeigt das Verhalten eines Kathodeneinzelblattes bei unterschiedlichen Differenzdrücken auf einem Niederdruckflächensauger (vollflächig).

Die Abweichungsdarstellung veranschaulicht, insbesondere im nicht angesaugten Zustand (Betriebsdruck = 0 bar), die geometrischen Defekte im Bereich des Ableiterfächchens (Welligkeit) und an den Kanten (Einrollen). Mit zunehmendem Differenzdruck bilden sich Pfade aus, in denen das Elektrodenblatt vom Greifer angesaugt wird. Die Ausprägung hängt dabei u.a. von den stochastisch verteilten geom. Defekten, den initialen Kontaktpunkten (Elektrode-Greifer) sowie den sich ergebenden Druckfeldern ab.

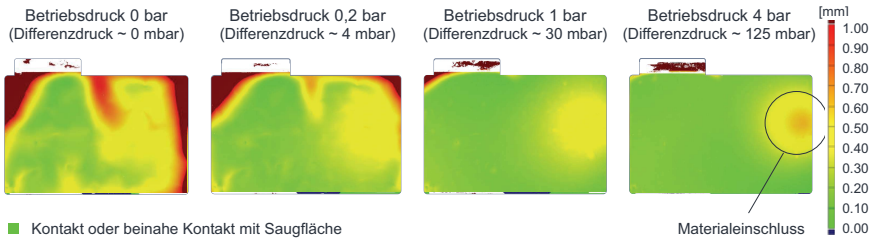


Abbildung 4-33: Kontaktausprägung beim Ansaugen des Kathodenblattes mittels Niederdruckflächensauger (vollflächig); Abweichungsdarstellung in Bildebene

Bei niedrigen Differenzdrücken (Betriebsdruck = 0,2 bar) wird deutlich, dass sich die Elektrode nicht notwendigerweise an die ebene Form des Niederdruckflächensaugers anpasst, wie auch in Götz (1991, S. 62) für formlabile Bauteile beschrieben. Dies führt zu Lecklufteinbruch und einem beträchtlichen Verlust an Haltesicherheit (Götz S. 63).

Mit der **Erhöhung des Differenzdrucks** zeigt sich, dass sich die Pfade zuerst in den Bereichen ausbilden, an denen das Elektrodenblatt bereits Kontakt bzw. beinahe Kontakt mit dem Flächengreifer hat (grüner Bereich). Ursächlich dafür sind u.a. die abstandsabhängigen Differenzdrücke zwischen Elektrode und Greifer. In Bezug auf das Verhalten biegeschlaffer Bauteile ist ein weiteres Phänomen bekannt, nämlich dass Materialien aufgrund des dynamischen Unterdruckmaximums im Greifer-Randbereich zuerst an diesem angesaugt werden und es somit zu einer unerwünschten Falte bzw. Materialeinschluss in der Mitte der Greiffläche kommen kann, vgl. Abbildung 4.33 rechts (Götz 1991, S. 87–88).

Der **Materialeinschluss** in Abbildung 4-33 wurde mithilfe des optischen Messsystems ATOS Triple Scan der Fa. GOM quantifiziert. Daraus ergibt sich eine Längen- und Breitenabweichung von 18 μm an der Stelle des Materialeinschlusses. Im Hinblick auf eine Vermessung der Elektrodenblattkontur oder eine Ablage der Elektrode auf einem Stapel stellt dieser Materialeinschluss eine unerwünschte Ungenauigkeit dar. Es gilt, je gleichmäßiger das Greifen, desto geringer die Lageabweichung (Götz 1991, S. 84).

Fazit

Aufgrund der geometrischen Defekte durch die Kalandrierung kann es zu inhomogenen Abständen und Differenzdrücken zwischen Elektrode und Greifer kommen. Dies kann

bei geringen Differenzdrücken zu Lecklufteinbruch und Haltekraftverlusten führen. Bei hohen Differenzdrücken kann es zu einer kontaktpunktabhängigen Ausbildung von Kontaktpfaden und einem bevorzugten Ansaugen im Greiferrandbereich kommen, infolgedessen Materialeinschlüsse entstehen können. Für die Handhabung mittels Flächengreifer folgt, dass unterschiedliche Abstände zwischen Elektrode und Handhabungselement stets zu vermeiden sind.

Zusammenfassung Handhabung

Die Untersuchungen unter Scherbeanspruchung haben gezeigt, dass bereits kleine Abschälwinkel zu signifikanten Haltekraftverlusten führen. Dabei sinkt der prozentuale Haltekraftverlust mit geringerem Differenzdruck und steigt für Materialien mit geringerer Biegesteifigkeit. Die max. Haltekraft wiederum steigt mit der Verringerung des Lochdurchmessers, wobei sich die Entwicklung stark materialabhängig darstellt.

Die Untersuchungen zur Handhabung von Einzelblattelektroden haben gezeigt, dass geometrische Defekte einen großen Einfluss auf den Greifvorgang und die sich ergebende Lage des Elektrodenblattes am Greifer haben können.

4.2.4 Ausrichtung

Da die optische und mechanische Ausrichtung im Kontext dieser Arbeit von untergeordneter Relevanz ist, wird dieses Thema nur angeschnitten. Dazu soll die folgende Frage beantwortet werden:

F12: Welchen Einfluss haben die Kalandrierung und damit einhergehende geometrische Defekte bei der Positionserfassung von Elektroden Einzelblättern?

Im Kontext der Ausrichtung ist nicht nur die Genauigkeit des verwendeten Kamerasystems, der Schnittkantenqualität und des Kreuztisches von Relevanz, vgl. Kapitel 4.1.2., sondern auch die geometrische Form des Elektrodenblattes während der Positionserfassung.

Insbesondere interessant in diesem Kontext sind zeitabhängige Effekte des Elektrodenblattes in Bezug auf die Zeit nach der Elektrodenablage sowie das Verhalten des Elektrodenblattes bei der Fixierung mittels Unterdrucks während der Vermessung.

Zeitabhängige Effekte bei der Relaxation von Elektrodenmaterialien sind insbesondere für kurze Zeitspannen relevant (Gupta & Ücel et al. 2020, S. 858). Gupta & Ücel et al. charakterisieren das Verhalten als nicht-linear und führen es maßgeblich auf die Wechselwirkung zwischen Binder und Kohlenstoff-Additiven zurück (2020, S. 856–868).

Die Effekte während des Fixierens eines Elektrodenblattes mittels Unterdruck wurden im vorherigen Unterkapitel bereits ausführlich diskutiert, darum soll nachfolgend nur auf die Auswirkungen in Bezug auf die Positionserfassung eingegangen werden.

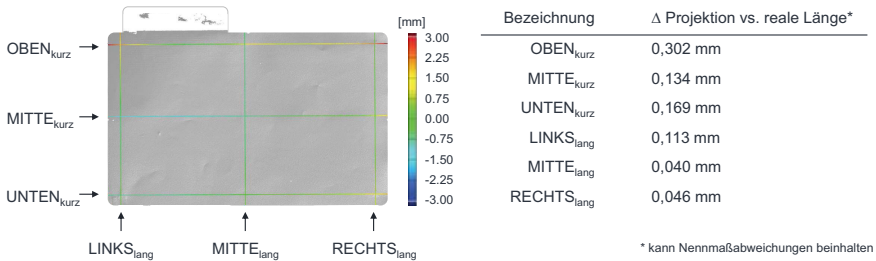


Abbildung 4-34: Längendifferenz zwischen projizierter und realer Länge eines vollflächig aufliegenden kalandrierten Kathodeneinzelblattes

Findet eine Vermessung im nicht angesaugten Zustand statt, kann es zu einer Abweichung zwischen der Länge und Breite der Projektion und den tatsächlichen Abmessungen kommen – siehe Abbildung 4-34. Wie bereits beschrieben, ist die Faltenbildung im Bereich des Ableiterföhnchens besonders groß, weshalb es dort folglich zu besonders starken Abweichungen kommt. Eine Vermessung des Kathodenblattes in diesem Bereich hat bspw. eine Abweichung von -0,113 mm an der Messlinie „LINKS_{lang}“ und -0,302 mm an der Messlinie „OBEN_{kurz}“ ergeben. Die Abweichung wurde aus dem Abstand des ersten und letzten Messpunktes an der Blattkante und der Länge der jeweiligen Messlinie (Summe aller Punktabstände auf der Linie) errechnet. Die Auswertung erfolgte mittels des ATOS Triple Scan Systems.

Da ein geometrischer Defekt auch den Abstand zwischen der Elektrode und dem mechanischen Anschlag verändert kommen diese Effekte ebenfalls bei der mechanischen Ausrichtung zum Tragen. Darüber hinaus ändert sich die lokale Nachgiebigkeit des Elektrodenblattes, wenn dieses nicht flach auf dem Untergrund aufliegt, sondern bspw. an der Ecke oder Blattkante nach oben/unten eingerollt ist.

4.2.5 Fügen und Fixierung

Nachfolgend wird auf den Einfluss beim Fügen, sprich die Blattübergabe vom Greifer an die Klemmung, sowie die Effekte beim Fixieren eingegangen. Dazu werden die beiden folgenden Forschungsfragen exemplarisch untersucht und beantwortet.

F13: Welchen Einfluss hat die Kalandrierung auf die Positioniergenauigkeit der Elektrodenblätter?

Beschreibung der Vorgehensweise

Die Vorgehensweise gliedert sich in vier Schritte, wobei die ersten drei Schritte analog zu den Schritten in Kapitel 4.2.2 (Vereinzelung) durchgeführt wurden. Im Anschluss an die Ablage des Elektrodenblattes auf der Stapelstation wurde dieses im letzten Schritt über zwei Niederhalter fixiert. Insgesamt wurden 36 Elektrodenstapel, bestehend aus jeweils vier Elektrodenlagen hergestellt. Nach der Stapelbildung wurde je eine Ecke des Zellstapels mit Klebstoff fixiert, um daraus eine Probe für die Vermessung im Röntgen Computertomograph (Zeiss Metrotom 800) präparieren zu können.

Die nachfolgende Auswertung fußt auf den Rohdaten, welche im Rahmen der Arbeit von A_Lin (2019) erhoben wurden. Ausgewertet wurde die in Kapitel 2.5.2 eingeführte Gesamtgenauigkeit der Elektrodenendflächen („overall end-phase alignment accuracy“) in Bahn längs- und Bahnquerrichtung, vgl. Abbildung 4-35, bezeichnet als „Stapelgenauigkeit des Moduls“. Diese wurde um die in Kapitel 4.2.2 ermittelte „Nennmaßabweichung“ bereinigt, um den Einfluss des Blattlängenzuschnitts von den Effekten bei der Positionierung und Fixierung trennen zu können. Dabei wird angenommen, dass sich die Blattlängentoleranz stets symmetrisch auf die Stapelgenauigkeit auswirkt.

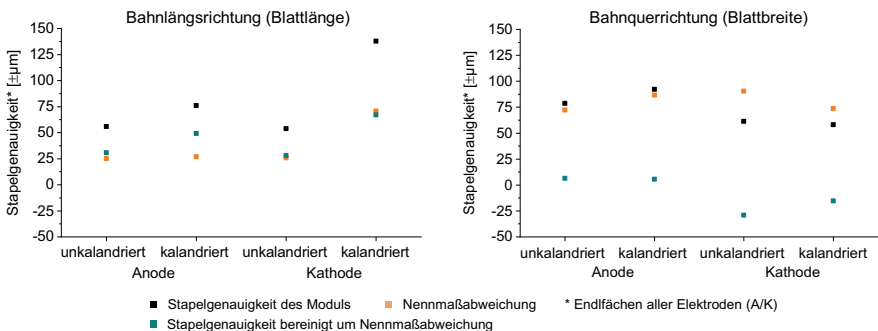


Abbildung 4-35: Positioniergenauigkeiten in Bahn längs- und Querrichtung

In Bezug auf die **Genauigkeit in Bahnlängsrichtung** zeigt sich, dass diese für unkalandrierte Anoden- und Kathodeneinzelblätter mit $\pm 55 \mu\text{m}$ deutlich höher ausfällt als für kalandrierte Anoden- ($\pm 75 \mu\text{m}$) und Kathodeneinzelblätter ($\pm 140 \mu\text{m}$). Insbesondere bei der Stapelbildung kalandrierter Kathodenblätter ist dies u.a. auf die etwa doppelt so hohe Schwankung beim Einzelblattzuschnitt zurückzuführen – vgl. Kapitel 4.2.2. Für die um die Nennmaßabweichung bereinigten Werte ergibt sich eine Abweichung im Bereich zwischen ± 25 bis $\pm 65 \mu\text{m}$, abhängig vom zu verarbeitenden Material. Der Bereich ist als theoretischer Wert zu interpretieren, welcher unter Absenz von Ungenauigkeiten beim Elektrodenblattzuschnitt mit dem Modul für die verarbeiteten Materialien erreicht werden kann. Die verbleibende Toleranz repräsentiert Ungenauigkeiten durch die Übergabe des Elektrodenblattes an den teilflächigen Niederdruckflächensauger und die Klemmung der Stapelstation sowie Ungenauigkeiten des mechanischen Aufbaus. Zu erkennen ist, dass kalandrierte Materialien größere Ungenauigkeiten hervorrufen. Insgesamt zeigt sich, dass die Nennmaßabweichungen der Elektrodenblätter etwa hälftig für die sich ergebenden Ungenauigkeiten bei der Stapelbildung verantwortlich sind.

Hinsichtlich der **Genauigkeit in Bahnquerrichtung** wird deutlich, dass die Nennmaßabweichungen der Elektrodeneinzelblätter einen sichtlich dominanteren Effekt auf die Genauigkeit des Stapelmoduls haben und diese maßgeblich definieren. Wird die „Nennmaßabweichung“ von der „Stapelgenauigkeit des Moduls“ subtrahiert, ergeben sich in Bahnquerrichtung deutlich geringere Toleranzen als in Bahnlängsrichtung. Dies kann u.a. darin begründet liegen, dass die Niederhalter in Bahnlängsrichtung wirken und so insbesondere in diese Richtung zusätzliche Ungenauigkeiten induzieren. Die Tatsache, dass die „Nennmaßabweichung in Querrichtung“ oberhalb der „Stapelgenauigkeit des Moduls“ liegt deutet zudem darauf hin, dass die Annahme einer symmetrischen Verteilung der Blattlängentoleranz im Zellstapel nicht uneingeschränkt gilt und damit einen weiteren Faktor für Ungenauigkeiten darstellt.

Fazit

Die Genauigkeit im gegebenen Aufbau ist richtungsabhängig (Bahnlängs- und Querrichtung) und darüber hinaus nicht spiegelsymmetrisch. Zudem ist die Stapelgenauigkeit insbesondere in Bahnquerrichtung von der Blattlängen- bzw. Blattbreitenschwan-

kung der Einzelelektrodenblätter abhängig. Des Weiteren wird deutlich, dass der Einfluss geometrischer Defekte nicht nur im Elektrodenblattzuschnitt, sondern auch bei der Handhabung und Fixierung der Elektrodenblätter eine wesentliche Rolle spielt.

Die auftretenden Effekte beim Klemmvorgang sollen im Rahmen der nächsten Forschungsfrage genauer betrachtet werden.

F14: Welchen Einfluss hat der Klemmvorgang auf die Stapelgenauigkeit?

Bis dato wurde auf die Einflüsse in der Materialführung, Vereinzeln, Handhabung und Ausrichtung eingegangen. Nun sollen auftretende Effekte beim Fügen und Fixieren erörtert werden. Dies ist wichtig, um die gemessenen Stapelgenauigkeiten im vorherigen Abschnitt besser einordnen zu können.

Die nachfolgende Auswertung zeigt drei Abweichungsdarstellungen (in Bildebene) während der Elektrodenblattübergabe. Die Abweichungsdarstellung verdeutlicht, dass das Kathodenblatt auch im nicht niedergehaltenen Zustand nicht eben auf der Bodenplatte aufliegt und es insbesondere im Bereich des Ableiterfährchens zu einem Aufwölben kommt, vgl. Abbildung 4-36 (links). Durch das Aufsetzen des Flächengreifers ergibt sich eine Relativbewegung des Materials zur Seite hin, siehe Abbildung 4-36 (Mitte). Das Aufsetzen des Niederhalters (Klemmfinger) hat einen analogen Effekt, wobei es letztlich zu einer Wölbung des Materials zwischen Flächengreifer und Niederhalter kommt, vgl. Abbildung 4-36 (rechts).

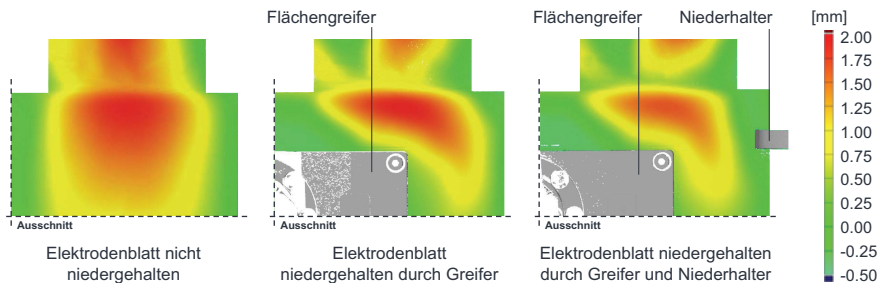


Abbildung 4-36: Abweichungsdarstellung einer Kathode im nicht fixierten (links), niedergehaltenen (Mitte) sowie niedergehaltenen und geklemmten (rechts) Zustand

Neben den obigen 3D-Messungen wurden Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera während des Stapelvorgangs durchgeführt. Dabei wurde das Verhalten

mehrerer Kathodeneinzelblätter in Interaktion zwischen teilflächigem Niederdruckflächensauger und Niederhalter untersucht, siehe Abbildung 4-37.

Der Verfahrensablauf gestaltete sich dabei wie folgt: Das Elektrodenblatt wird über den teilflächigen Flächensauger auf dem Stapel abgelegt während der Niederhalter geschlossen ist. Im Anschluss öffnet der Niederhalter, während der Flächensauger auf dem Stapel verweilt um diesen zu fixieren. Daraufhin wird der Niederhalter wieder geschlossen und den Greifer vom Stapel zu entfernen. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrensablaufs findet sich in Baumeister (2017, S. 141–142).

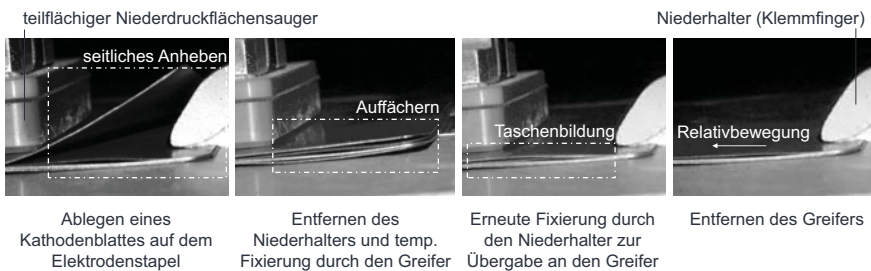


Abbildung 4-37: High-Speed-Kamera Aufnahme des Klemmvorgangs

Die Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera veranschaulichen mehrere Effekte. Erstens, durch das Niederhalten mittels Flächengreifer kommt es zu einem verstärkten **Auffächern des Zellstapels** im Randbereich, welches durch das seitliche Anheben durch den Klemmfinger begünstigt wird – vgl. Abbildung 4-37 links. Dieses entsteht aufgrund der allgemeinen Kompressibilität der Lagen, da diese – bedingt durch die geometrischen Defekte (Welligkeit) – nicht eben und mit Eigenspannungen behaftet sind. Darüber hinaus kommt es bei der Ablage und dem Entfernen des Niederhalters zu einem **Einschluss von Luft** zwischen den Lagen, welche nur seitlich entweichen kann. Letztlich spielt auch das **zeitabhängige Verhalten des Binders** eine Rolle, da die zuletzt abgelegte Elektrode durch den Niederhalter seitlich hochgebogen wird (Gupta & Ücel et al. 2020, S. 848; Watanabe & Yuhara et al. 2012).

Bei der Übergabe kommt es dann zur **Taschenbildung**, bei welcher sich Material zwischen dem teilflächigen Niederdruckflächensauger und Niederhalter aufwölbt und eingeschlossen wird. Wo und wie stark sich das Material auffächert und wölbt ist schwer vorherzusehen, genauso wie die etwaige Relativbewegung des Materials. Dies ist unter

anderem auf die undefinierten Kontaktbedingungen zwischen den Elektrodenlagen zurückzuführen (Gupta & Ücel et al. 2020, S. 848).

Ein weiterer wichtiger Effekt im Kontext der Übergabe-Effekte ist, dass die Elektrode, wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, durch die Wirkung des Unterdrucks in die plane Form des Greifers gezwungen wird. Mit der Übergabe vom Flächengreifer an die Klemmung entfällt diese formgebende Kraft, sodass die Elektrode dazu tendiert sich in ihren Ursprungszustand vor dem Ansaugen „zurückzuformen“ (Formgedächtnis). Dies führt gleichermaßen zu Relativbewegungen im Stapel, welche vom Grad der geometrischen Defekte des Materials abhängen.

Fazit

Niederdruckflächensauger und Niederhalter beeinflussen die geometrische Form der Elektrode, wobei Änderungen jeweils mit Relativbewegungen einhergehen. Die Nachgiebigkeit der Elektrode hängt u.a. von der Schwere der geometrischen Defekte ab und nimmt – für den Stapel gesehen – mit der Anzahl der Elektrodenlagen zu. Die geometrische Form, Nachgiebigkeit, das Relaxationsverhalten und der Lufteinschluss führen zu einer Taschenbildung, welche wiederum Ungenauigkeiten in Wirkrichtung der Klemmung induzieren. Abhilfe können vollflächige Greifer schaffen, vgl. Kapitel 2.

Zusammenfassung Fügen und Fixierung

Für die Untersuchungen im gegebenen Aufbau zeigt sich, dass die Genauigkeit des Stapels richtungsabhängig und nicht spiegelsymmetrisch ist. Die Richtungsabhängigkeit ist dabei insbesondere von der Blattlängen- und Blattbreitenschwankung beeinflusst. Im Kontext der Stapelbildung ebenfalls von großer Bedeutung sind die Relativbewegungen bei den Übergabevorgängen zwischen Flächensauger und Niederhalter, welche durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst werden.

4.3 Ableitung von Prämissen zur Auslegung des Anlagenmoduls

Auf den Defiziten und der bewährten Praxis in der Vereinzelung und Stapelbildung basierend sowie auf Grundlage der Analyse der Teil- und Einzelprobleme, werden **nachfolgend Prämissen zur Auslegung** des flexiblen Stapelmoduls **formuliert**.

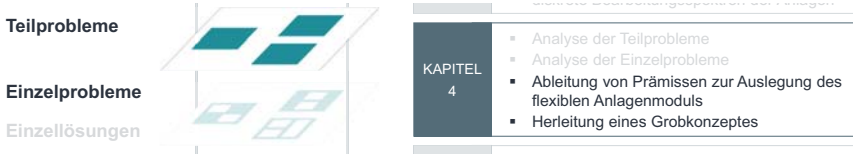


Abbildung 4-38: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 4 (Teil 3)

Der Übersichtlichkeit halber sind diese in drei Themenbereiche gegliedert, nämlich **Kontinuität und Produktivität**, **Flexibilität** und **Qualität**. Innerhalb dieser Bereiche erfolgt wiederum eine Kategorisierung zur Strukturierung der Einzelprämissen, siehe erste Tabellenspalte. Die letzten beiden Tabellenspalten enthalten einen Verweis auf den Ursprung (Kapitel und Seite), aus denen die Prämisse abgeleitet wurde.

4.3.1 Kontinuität und Produktivität

Tabelle 4-9: Kontinuitäts- und produktivitätsbestimmende Prämissen

| Kategorie | Prämisse (zentrale Anforderung, optionale Anforderung) | Ursprungskapitel | Seite |
|-----------------|--|-----------------------|---------------|
| Kinematik | P1-01 Bewegungsumkehr und hohe Dynamik im Prozess vermeiden | 2.5.2 | 53f |
| | P1-02 Zu- und Rückstellbewegungen vermeiden | 2.5.2 / 4.1.2 | 53 / 72 |
| | P1-03 Kontinuierliche Verfahrensführung für alle Materialien anstreben | 4.1.1 | 63 |
| | P1-04 Zuschnittgenauigkeit von Einflüssen durch Synchronisation entkoppeln | 4.1.2 | 65f |
| Maschinenaufbau | P1-05 Gewicht aller bewegten Teile weitestmöglich reduzieren | 2.5.2 | 51 |
| | P1-06 Auf Magazine zum Zwischenspeichern von Elektroden verzichten | 2.5.1 / 2.5.2 / 4.1.1 | 42 / 48 / 63f |
| | P1-07 Schnellen Austausch der Schneidwerkzeuge ermöglichen | 2.5.1 | 41 |
| | P1-08 Formatunabhängige Ausrichtung (Elektrode) ohne Rüsten anstreben | 4.1.3 | 77f |
| Parameter | P1-09 Entkopplung von Bearbeitungsgeschwindigkeit und Bahnzugkraft anstreben | 2.5.2 | 53 / 54 |
| Prozess | P1-10 Konstanten Materialdurchsatz zur Vermeidung der Entstehung von Über- und Unterkapazitäten bei Formatänderungen anstreben | 2.4.3 / 2.7 | 34 / 58 |
| | P1-11 Einzelprozessschritte durch Funktionsintegration reduzieren | 2.4.1 | 21 |
| | P1-12 Funktionsintegration anstreben | 2.4.1 | 21 |
| | P1-13 Komplexitätsreduktion durch Funktions- und Prozessintegration erzielen | 2.4.1 / 2.4.3 | 21 / 34 |
| | P1-14 Nicht wertschöpfende und zeitaufwendige Funktionen eliminieren | 4.1.2 | 66 / 72 |
| | P1-15 Keine unfixierten (losen) Zwischenprodukte im Prozess erzeugen | 2.4.3 | 34 |
| | P1-16 Harmonisierung der Geschwindigkeit für die Vereinzelung und Stapelbildung | 2.4.3 | 34 |
| | P1-17 Repetitive Vorgänge (z.B. Ausrichtung) vermeiden | 2.5.1 / 2.5.2 | 42 / 51 |
| | P1-18 Einmal hergestellte Genauigkeiten beibehalten | 4.1.1 | 64 |
| | P1-19 Funktionen zum Messen, Prüfen und Orientieren in den Prozessablauf integrieren | 4.1.2 | 68 |
| Verbundbauweise | P1-20 Stapelverfahren mit Einzelelektroden bevorzugen (mehr Freiheitsgrade) | 2.3.2 | 12f |
| | P1-21 Stapelverfahren ist Wickelverfahren vorzuziehen (bessere Zell-Performance) | 2.3.3 | 14f |
| Zellformat | P1-22 Entkopplung von Elektrodengröße und Bearbeitungsgeschwindigkeit anstreben | 4.1.2 | 67 |

Kinematik: Gegenwärtige Verfahren arbeiten meist diskontinuierlich über eine Zu- und Rückstellbewegung von Werkzeugen und Endeffektoren. Diese periodische Bewegungsumkehr und Notwendigkeit zur fortwährenden Synchronisation führt zu Restriktionen bei der Verarbeitungsgeschwindigkeit und der zu erreichenden Qualität (z.B. Nennmaß-Abweichungen). Eine kontinuierliche Verfahrensführung sowie der Verzicht auf Synchronisationsvorgänge stellen eine Möglichkeit zur Adressierung dieser Defizite dar.

Maschinenaufbau: Das Gewicht bewegter Teile muss geringstmöglich sein, um Geschwindigkeitsbegrenzende Restriktionen zu minimieren. Auf ein Magazinieren der Elektrodeneinzelblätter soll verzichtet werden, da dieses fehleranfällig und nicht wertschöpfend ist. Zur Sicherstellung hoher Verfügbarkeiten müssen Werkzeuge schnell austauschbar sein. Darüber hinaus muss die Maschine eine formatunabhängige Ausrichtung (Elektrode) ohne aufwendige Anpassungen und Rüstvorgänge ermöglichen.

Parameter: Die Erhöhung der Verarbeitungsgeschwindigkeit darf nicht zu einer zwangsweisen Erhöhung anderer Prozessparameter (z.B. Bahnzugkraft) führen.

Prozess: Prinzipiell ist ein prozessübergreifender konstanter Materialdurchsatz anzustreben, welcher die Entstehung von Über- und Unterkapazitäten bei Formatänderung minimiert und das ursprüngliche Line-Balancing weitestgehend erhält. Über eine Funktionsintegration soll eine Reduzierung der Einzelprozessschritte erfolgen und damit die Komplexität innerhalb der Anlage und Linie verringert werden. Dies beinhaltet eine Integration zeitaufwendiger Funktionen (Messen etc.) sowie die Eliminierung nicht wertschöpfender Tätigkeiten. Darüber hinaus sind repetitive Vorgänge zu vermeiden, bspw. durch die Sicherung bereits hergestellter Genauigkeiten. Lose Zwischenprodukte sind zu vermeiden, da diese die Komplexität und Fehleranfälligkeit im Prozess erhöhen.

Verbundbauweise: Verfahren zur Elektroden-Einzelblattstapelbildung sind wickelnden Verfahren vorzuziehen, da diese mehr Freiheitsgrade bei der Verbundherstellung erlauben und bessere Produkteigenschaften ermöglichen.

Zellformat: Der Durchsatz des Verfahrens soll nicht an das zu produzierende Format gekoppelt sein, aufgrund der eingangs beschriebenen Probleme beim Line-Balancing.

4.3.2 Flexibilität

Tabelle 4-10: Flexibilitätsbestimmende Prämissen

| Kategorie | Prämisse (zentrale Anforderung, optionale Anforderung) | Ursprungskapitel | Seite |
|-----------------|---|------------------|--------------|
| Maschinenaufbau | P2-01 Bearbeitungsspektrum ohne Teiletausch/Rüstvorgang realisieren | 2.6 | 56 |
| | P2-02 Elektrodenblattlänge von Restriktionen des mech. Aufbaus (z.B. Bauräume) entkoppeln | 4.1.2 / 4.1.3 | 67 / 75 |
| | P2-03 Formatgebundene Teile (Greifer, Grundplatten, etc.) vermeiden | 4.1.3 | 78 |
| | P2-04 Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit dürfen nicht im Widerspruch stehen | 2.5.1 / 4.1.2 | 37 / 66 |
| | P2-05 Definiertes Greifen bei gleichzeitig hoher Flexibilität ermöglichen | 4.1.3 | 76 |
| | P2-06 Sensorpositionen möglichst formatunabhängig wählen | 4.1.3 | 78 |
| | P2-07 Schneidposition im µm-Bereich einstellbar (Ausgleich Über-/Untermaß) | 4.2.2 | 99 |
| | P2-08 Niederhalter sollen unabhängig von Bahnbreite und Beschichtungsdicke zur Stabilisierung des Schnittes wirken können | 4.2.2 | 97f |
| Material | P2-09 Eignung für unterschiedliche Materialsysteme und Bearbeitungszustände | 2.1 / 2.2.3 | 4 / 8 |
| | P2-10 Optimale Führung und Ausrichtung von Materialbahnen variabler Breite | 4.1.3 | 75 |
| Parameter | P2-11 Anlagenparameter (z.B. Ein-/Auslaufängen) sollen materialabhängig wählbar sein | 4.2.1 | 89 / 92 / 95 |
| Prozess | P2-12 Herstellbare Einzelblattgröße von Materialeigenschaften (Biegesteifigkeit) entkoppeln | 4.1.3 / 4.2.1 | 75 / 82 |
| | P2-13 Flexibilität in beiden Prozessschritten (Vereinzeln, Stapeln) adressieren | 2.6 / 4.1.1 | 56 |
| Zellformat | P2-14 Großes Bearbeitungsspektrum für unterschiedliche Zellformate abdecken | 2.3.3 / 2.3.4 | 16f |
| | P2-15 Elektrodenweite soll besonders flexibel anpassbar sein | 4.1.3 | 73f |

Maschinenaufbau: Ein reelles Bearbeitungsspektrum ohne zeitintensive Rüstvorgänge soll realisiert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es nicht zu Restriktionen durch den mechanischen Aufbau, bspw. bei der Materialübergabe, kommt. Generell ist auf formatgebundene Anfertigungsteile zu verzichten.

Material: Das Anlagenmodul soll mit unterschiedlichen Materialsystemen (z.B. unterschiedliche Binderanteile) und Bearbeitungszuständen (z.B. Bahnbreiten) umgehen können und dabei stets eine optimale Materialführung und Ausrichtung ermöglichen.

Parameter: Anlagenparameter (Ein-/Auslaufängen, Bahnzug, etc.) sollen in einem weiten Bereich wählbar sein, um eine Vielzahl an Materialien verarbeiten zu können.

Prozess: Die Flexibilität soll sowohl in der Vereinzelung als auch Stapelbildung adressiert werden, da eine isolierte Betrachtung die Gesamtproblematik nicht löst. Ebenso sind formatseitige Restriktionen durch Materialeigenschaften zu vermeiden.

Zellformat: Grundsätzlich ist ein breites Bearbeitungsspektrum abzudecken um einen großen Markt bedienen zu können. Basierend auf der Flexibilitätsanalyse sind eine Weite im Bereich von 50 bis 350 mm, eine Höhe von 25 bis 225 mm und eine Tiefe von 3 bis 15 mm erstrebenswert.

4.3.3 Qualität

Tabelle 4-11: Qualitätsbestimmende Prämissen

| Kategorie | Prämisse (zentrale Anforderung, optionale Anforderung) | Ursprungskapitel | Seite |
|--|--|------------------|-----------|
| Maschinen- aufbau | P3-01 Ausrichtgenauigkeit soll weitestgehend materialunabhängig sein | 2.5.2 / 4.1.3 | 52 / 78 |
| | P3-02 Verzicht auf teillächige Greifer (Abschälereffekte, Unterdrucküberhöhung) | 2.5.2 | 50 |
| | P3-03 Als Greifer-Typ Niederdruckflächensauger einsetzen, da dieser reinigend wirkt und materialschonend ist | 2.5.2 | 49 |
| | P3-04 Lochdurchmesser am Flächengreifer möglichst optimal (klein) wählen | 4.2.3 | 106 |
| | P3-05 Komponenten hoher Präzision verwenden (Zuschnitt, Positionierung) | 2.5.2 / 4.1.2 | 52 / 65ff |
| | P3-06 Optische Ausrichtsysteme verwenden (höhere Genauigkeit) | 5.5.2 / 4.2.4 | 52 / 111 |
| | P3-07 Anlagenbedingte Längsfaltenbildung (z.B. durch Walzendurchbiegung) vermeiden | 4.2.1 | 93 / 94 |
| | P3-08 Biegeradien innerhalb der Anlage groß wählen (Materialschädigung) | 4.2.1 | 89ff |
| | P3-09 Hartstahlmesser für das Ablängen verwenden | 2.4.2 | 33 |
| | P3-10 Servo-pneumatische Achsen (Regelbarkeit / Anpressdruck) einsetzen | 2.5.2 | 50f |
| Parameter | P3-11 Differenzdruck am Greifer möglichst gering wählen (Beschädigungen) | 4.2.3 | 104 |
| | P3-12 Vermessung biegeschlaffer Bauteile im kontrollierten Zustand | 4.2.4 | 111 |
| | P3-13 Bahnzug in weitem Bereich einstellbar gestalten (Zuschnittgenauigkeit) | 4.2.2 | 98ff |
| | P3-14 Vorspannung von Ober- und Untermesser ermöglichen (Schnittqualität) | 2.5.1 | 40 |
| Prozess | P3-15 Partikelentstehung und Querkontamination vermeiden | 2.3.3 / 2.5.1 | 14 / 38 |
| | P3-16 Elektrodenbahn an Schnittkante (nicht Beschichtungskante) ausrichten | 2.4.2 | 24 |
| | P3-17 Prozessqualität beim Greifen von Materialeigenschaften (Biegesteifigkeit) entkoppeln | 4.1.3 / 4.2.3 | 77 / 109 |
| | P3-18 Abschälereffekte am Greifer vermeiden | 4.2.3 | 104 |
| | P3-19 Inhomogenitäten bei sich ausbildenden Druckfeldern vermeiden | 4.2.3 | 109 |
| | P3-20 Anzahl der Handhabungsvorgänge minimieren (Beschädigungsrisiko) | 4.1.1 | 63 / 64 |
| | P3-21 Homogenen Abstand zwischen Material (Elektrode) und Greiferwirkfläche sicherstellen | 4.2.3 | 108 |
| | P3-22 Materialübergabe kontrolliert gestalten (Speichern in Magazinen erzeugt Ungenauigkeiten) | 4.1.1 | 63f |
| | P3-23 Vollflächiges Greifen bevorzugen (Kontrollierbarkeit Materialposition) | 2.5.2 | 49 |
| | P3-24 Greifen biegeschlaffer Bauteile in kontrolliertem Zustand durchführen | 4.2.3 | 109f |
| | P3-25 Einfluss geometrischer Defekte durch optimale Materialführung reduzieren | 4.1.1 | 63 / 93f |
| | P3-26 Ableiterföhnchen nicht durch Flächengreifer ansaugen (Beschädigungen) | 2.4.2 | 49 |
| | P3-27 Bearbeitungsreihenfolge Längsschneiden - Notching - Ablängen zur besseren Kontrollierbarkeit des Materialzustandes präferieren | 4.2.2 | 101f |
| | P3-28 Ablängvorgang durch etablierte Technologie (z.B. Scherschneiden) realisieren | 2.2.2 | 7 |
| P3-29 Elektrodenbahn beim Schneiden fixieren (Stabilisierung Schneidprozess) | 2.5.1 | 40f | |
| Verbundbauweise | P3-30 Stapelgenauigkeit soll Stand der Technik entsprechen ($\pm 0,2$ bis $\pm 0,3$ mm) | 2.5.2 | 47 |

Maschinenbau: Hinsichtlich der Ausrichtung ist darauf zu achten, dass diese sowohl für die Materialbahn als auch das Einzelblatt materialunabhängig und mit hoher

Genauigkeit erfolgt. In Bezug auf die Greiftechnik stellt sich ein vollflächiger Niederdruckflächensauger als bestmögliche Option dar, dessen Lochdurchmesser optimal auf das Material ausgelegt ist. Bei den qualitätskritischen Einzelprozessschritten ist die Verwendung von Komponenten hoher Präzision anzustreben, bspw. bei den Ausrichtsystemen. Bei der Komponentenauslegung ist darauf zu achten, dass diese keine geometrischen Fehler (z.B. Längsfalten) und Beschädigungen (Rissbildung) induzieren. Im Hinblick auf die Vereinzelung stellt die Verwendung von Hartstahlmessern den Stand der Technik dar. Für Übergabevorgänge eignet sich eine Kombination von Servo- und pneumatischem Antrieb, um eine simultan gute Positions- und Kraftregelung umzusetzen.

Parameter: Der Differenzdruck am Greifer soll frei eingestellt und möglichst gering gewählt werden, um Materialbeschädigungen vorzubeugen. Die Erfassung von Positionswerten bei der Vermessung biegeschlaffer Bauteile soll in einem kontrollierten Zustand erfolgen, um Messfehlern vorzubeugen. Da die Zuschnittgenauigkeit einen großen Stellhebel bei der Erhöhung der Stapelgenauigkeit darstellt, muss der Bahnzug in einem weiten Bereich wählbar sein. Zur Erzielung hoher Schnittqualitäten bei der Vereinzelung müssen Ober- und Untermesser frei einstellbar sein (z.B. Vorspannung).

Prozess: Die Prozessführung ist so zu gestalten, dass Partikelentstehung reduziert und Querkontamination vermieden wird. Hinsichtlich der Materialführung soll das Material stets an der Schnittkante ausgerichtet werden, da sich die Beschichtungskante weniger gut zur Erfassung eignet (auslaufende Geometrien, Beschichtungsversatz). Die Prozessqualität beim Greifen soll weitestgehend von den Materialeigenschaften entkoppelt werden. Darüber hinaus sind Übergabevorgänge möglichst kontrolliert durchzuführen, um Faltenbildung und damit Ausrichtungsfehler zu minimieren. Insbesondere die Materialführung spielt dabei eine zentrale Rolle, genauso wie die Einhaltung einer Bearbeitungsreihenfolge in welcher der Bahnzustand möglichst gut kontrolliert werden kann. Eine gute Kontrollierbarkeit ist auch für das Ablängen von Vorteil, bei welchem eine Fixierung des Materials zur Stabilisierung des Schneidvorgangs anzustreben ist.

Qualitätsparameter: (notwendige) Stapelgenauigkeit

Die Stapelgenauigkeit wird oft als einer der zentralen Qualitätsparameter für die Stapelbildung diskutiert (Kurfer & Westermeier et al. 2012b S. 34). In deren Zusammenhang werden nicht selten extrem hohe Genauigkeitsanforderungen von $\pm \leq 0,1$ mm formuliert (Reinhart & Zeilinger et al. 2013, S. 6), oft ohne weitere Spezifikation und Bezugnahme auf die Qualität der zu verarbeitenden Zwischenprodukte (Elektroden).

Wie bereits beschrieben, definiert die **Genauigkeit der Vereinzelung** das **untere Limit der zu erreichenden Stapelgenauigkeit**. Vereinzelungsverfahren werden bzgl. deren Schnittbreiten- und Schnittlängengenauigkeit mit $\pm 0,2$ bis $\pm 0,3$ mm angegeben, vgl. Kapitel 2. Folglich liegt das untere Limit der zu erreichenden Stapelgenauigkeit bei $\pm 0,1$ bis $\pm 0,15$ mm, wobei dieses nur theoretisch zu erreichen ist. Untersuchungen in Kapitel 4 haben gezeigt, dass es eine Reihe von Einzelursachen für die Entstehung von Ungenauigkeiten in der Stapelbildung gibt. Diese lassen sich, in Anlehnung an die Klassifizierung von Götz (1991, S. 90), in fünf Hauptursachen untergliedern, vgl. Abb. 4-39:

1. **Ungenauigkeit Vereinzelung:** Gestaltabweichungen (Abmessungen, Form)
2. **Ungenauigkeiten Ausrichtung:** Bereitstellungsabweichungen (Lage)
3. **Ungenauigkeiten Handhabung:** Lagetoleranz am Greifer (Materialeinschluss)
4. **Ungenauigkeiten Fügen/Fixierung:** Bewegungstoleranzen (Taschenbildung)
5. **Ungenauigkeit Aufbau:** Positionier- und Regeltoleranzen (Komponenten)

Diese Toleranzen führen zu einer Reduzierung der erreichbaren Stapelgenauigkeit, die üblicherweise im Bereich von $\pm 0,15$ bis $\pm 0,3$ mm liegt, vgl. Kapitel 2.5.2.2. Abbildung 4-39 verdeutlicht nochmals die Abhängigkeit der Stapelgenauigkeit von der Vereinzelung, dem Format und Material.

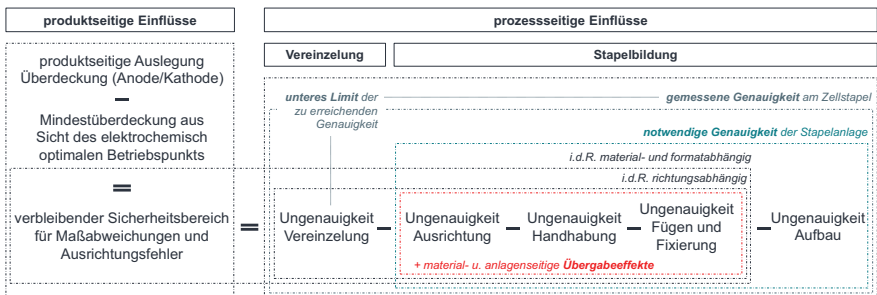


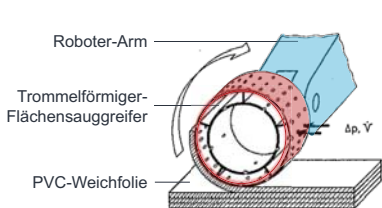
Abbildung 4-39: Ungenauigkeiten in der Vereinzelung und Stapelbildung

4.4 Herleitung eines Grobkonzeptes für ein flexibles Verfahren

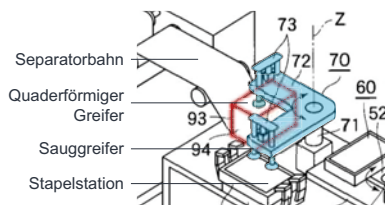
In diesem Unterkapitel soll ein **Grobkonzept** hergeleitet werden, welches **auf den Prämissen** des vorherigen Unterkapitels sowie relevanten **Vorarbeiten basiert**.

Die **Prämissen** betreffend, soll eine kontinuierliche Verfahrensführung ohne Zu- und Rückstellbewegungen umgesetzt werden. Gleichzeitig soll über eine Funktionsintegration eine Reduzierung der Einzelprozessschritte und nicht wertschöpfender Tätigkeiten erreicht werden. Das Verfahren wird weiterhin durch eine hohe Kontrolle bei der Materialübergabe sowie die Vermeidung loser Zwischenprodukte im Prozess charakterisiert und adressiert sowohl den Vereinzlungs- als auch Stapelbildungsprozess. Das grundlegende Ziel des neuen Verfahrens besteht in der Umsetzung eines reellen Bearbeitungsspektrums ohne formatgebundene Anfertigungsteile und zeitintensive Rüstvorgänge. Dazu soll das Verfahren u.a. ohne Magazine zur Speicherung von Elektroden auskommen, um repetitive Vorgänge und Fehlermöglichkeiten in der Handhabung zu reduzieren sowie die Gesamtkomplexität zu minimieren.

Im Zusammenhang mit den obigen Prämissen sind **zwei Anwendungsbeispiele besonders relevant**, nämlich der in Götz (1991) beschriebene „Trommelförmige Flächensauggreifer“ sowie der in Shirakawa & Yokota et al. (2005) patentierte Aufbau zur Separator-Führung, vgl. Abbildung 4-40.



Anwendungsbeispiel: Trommelförmiger Greifer



Anwendungsbeispiel: Separator-Führung

Abbildung 4-40: Trommelförmiger Greifer (in Anlehnung an (Götz 1991, S. 160) und Separator-Vereinzlung (in Anlehnung an (Shirakawa & Yokota et al. (2005, S. 8))

Die in Götz beschriebene Greifer-Sonderform, der sog. „**Trommelförmige Flächensauggreifer**“, stellt einen Zylinder mit Sauglöchern an dessen Umfangsfläche dar. Dieser dient zur Handhabung von PVC-Folien, welche über eine Abrollbewegung des Greifers durch eine sog. „synchronisierte Linear-Drehbewegung“ aufgenommen werden. (Götz 1991, S. 159)

Ein weiteres relevantes Anwendungsbeispiel stellt ein Patent der „Shibaura Mechatronics Corporation“ aus dem Jahr 2005 dar. In diesem wird die **Förderung einer Separatorbahn** mittels quaderförmigem Greifer beschrieben, allerdings ohne dabei explizit auf den Mechanismus der Vereinzelung einzugehen. (Shirakawa & Yokota et al. 2005)

Die nachstehende Abbildung ordnet die Anwendungsbeispiele im Hinblick auf die formulierten (Haupt-)Prämissen ein. Dabei wird deutlich, dass einzelne Prämissen zwar (teilweise) erfüllt werden, die Gesamtproblematik aber ungelöst bleibt.

Der Trommelförmige Greifer gestattet Materialflexibilität (z.B. hohe Beschichtungsdicke), allerdings ist das Verfahren durch die Einzelaufnahme der Folien nicht kontinuierlich und aufgrund des Einsatzes eines Roboters zur Bewegung der Trommel mit Zu- und Rückstellbewegungen behaftet. Eine Formatflexibilität ist teilweise gegeben und wird im Wesentlichen durch die Trommelbreite und den Umfang beschränkt. Eine Funktionsintegration existiert nicht, da die Linear-Drehbewegung rein der Materialaufnahme dient. Zudem wird die PVC-Folie, analog zur Verwendung eines Magazins, abgestapelt.

| (Haupt-)Prämisse | Götz (1991) | Shirakawa & Jokota et al. (2005) * |
|---------------------------------------|-------------|------------------------------------|
| Materialflexibilität | ● | ◐ |
| Kontinuierlicher Durchsatz | ○ | ○ |
| Keine Zu- und Rückstellbewegungen | ○ | ○ |
| Formatflexibilität | ◐ | ○ |
| Funktionsintegration | ○ | ◐ |
| Keine Verwendung von Magazinen | ○ | ● |
| Gute Kontrollierbarkeit des Materials | ◐ | ◐ |

* Bewertet wird nur der Prozess für die Separatorbahn

● gut ◐ mittel ○ schlecht

Abbildung 4-41: Bewertung der Anwendungsbeispiele in Götz (1991) und Shirakawa & Yokota et al. (2005) im Hinblick auf die formulierten Prämissen

Der Anlagenaufbau im vorgestellten Patent schränkt die Materialflexibilität insofern ein, als dass der quaderförmige Greifer an den Ecken geringe Biegeradien aufweist. Die Materialförderung ist weiterhin getaktet, da das Material über eine Schwenkbewegung (Zu- und Rückstellbewegung) von einem Greifer aufgenommen und weitergegeben wird. Bedingt durch die fixe Geometrie des Quaders bietet das Verfahren keinerlei Flexibilität. Eine Funktionsintegration findet vermutlich statt, da das Material am Greifer vereinzelt wird – offen bleibt jedoch, wie dieser Vorgang vonstattengeht. Vorteilhaft ist

der Verzicht auf Magazine sowie die gute Kontrollierbarkeit des Materialzustandes beim Aufwickeln auf den quaderförmigen Greifer.

Basierend auf den formulierten Prämissen sowie den Überlegungen in Götz (1991) und Shirakawa & Yokota et al. (2005), soll folgend ein Konzept zur flexiblen Vereinzelung und Stapelbildung vorgestellt werden – vgl. Abbildung 4-42. Die **Systemgrenze** wird, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, nach dem Notching und vor dem Fixieren gezogen. Die **Aufgabe des flexiblen Verfahrens** ist die **beschädigungsfreie Führung, präzise Ausrichtung, kontrollierte Handhabung, maßhaltige Vereinzelung** sowie die **Zustellung und Ablage der erzeugten Einzelblätter auf einer Stapelstation**. Die Herstellung eines vollen Zellverbundes ist kein Bestandteil der Lösung und soll nur an einem Beispiel, Gesamtprozessablauf „Exinos“, veranschaulicht werden.

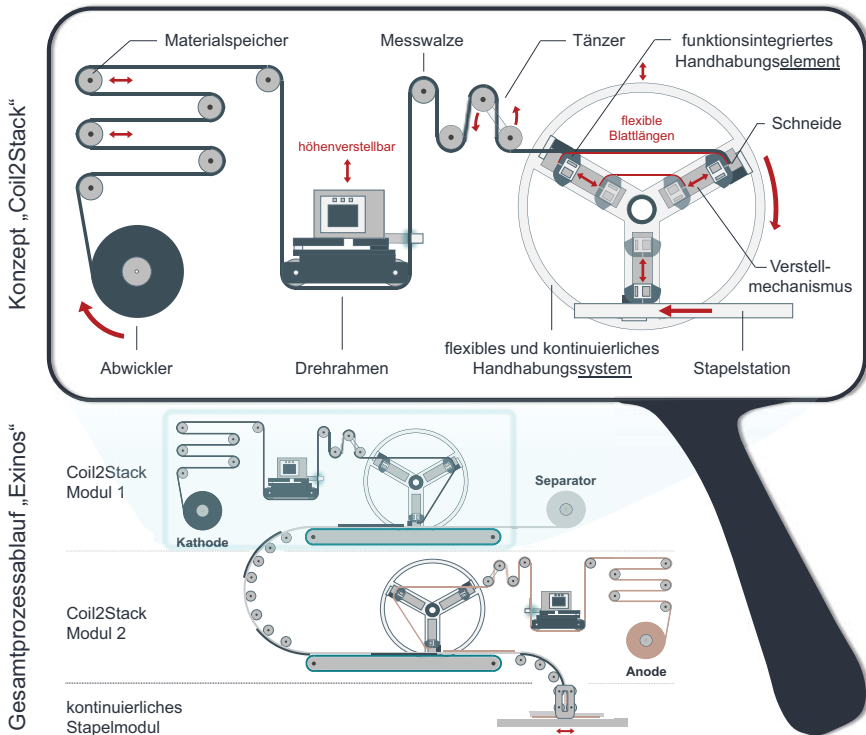


Abbildung 4-42: Konzept des flexiblen Vereinzelungs- und Stapelbildungsmoduls „Coil2Stack“ im Kontext des Gesamtprozessablaufs „Exinos“

Das Coil2Stack Verfahren ist der zentrale Teil des hier skizzierten Gesamtprozessablaufs Exinos. Dieser besteht, wie in Abbildung 4-42 dargestellt, im Kern aus zwei Coil2Stack Modulen, welche über eine kontinuierliche Bahnführung miteinander gekoppelt sind. Im Gesamtprozessablauf ist die Herstellung eines Elektrode-Separator Verbundes dargestellt, welche anschließend in einem kontinuierlichen Stapelmodul gefaltet wird. Der Gesamtprozessablauf kann als Z-Faltung oder in einer anderen Form ausgeführt werden. Die Art der Verbundherstellung, vgl. Abbildung 2-6 in Kapitel 2.3.2, wird durch das Coil2Stack Verfahren nicht vorgegeben und bleibt frei wählbar.

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Entwicklung des zentralen Coil2Stack Moduls liegt, soll dessen Prozessablauf im Folgenden kurz beschrieben werden.

Kurzbeschreibung des Coil2Stack Verfahrens

Abbildung 4-42 oben zeigt, wie die Materialbahn kontinuierlich abgewickelt und dem Materialspeicher zugeführt wird. Anschließend erfolgt eine Ausrichtung der Schnittkante über einen höhenverstellbaren Präzisions-Drehrahmen und daraufhin die Übergabe an ein Messwalze-Tänzersystem zur Regelung der Bahnzugkraft. Die ausgerichtete Materialbahn wird sodann auf die funktionsintegrierten Handhabungselemente geführt, welche das Material über einen runden Flächengreifer fixieren. Das flexible und kontinuierliche Handhabungssystem führt eine kontinuierliche Hub-Drehbewegung aus, in welcher das Material über ein in das Handhabungssystem integriertes Schneidsystem vereinzelt und gleichzeitig der Stapelstation zugestellt wird. Zur Materialübergabe wird das Handhabungssystem auf die Tischplatte der Stapelstation bzw. ein Förderband aufsynchronisiert.

Die Handhabungselemente können, wie in Abbildung 4-42 oben gekennzeichnet, in deren Position radial nach innen und außen verfahren werden, wodurch unterschiedliche Abstände zwischen den Schneiden realisiert werden können. Dieser Mechanismus erlaubt die freie Wählbarkeit der Elektrodenblattlänge in einem vorgegebenen Intervall ohne weitere Anpassungsaufwände.

Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens erfolgt im Zuge des nächsten Kapitels.

5 Auslegung des Anlagenmoduls

Die Auslegung des flexiblen Anlagenmoduls erfolgt auf Basis der Prämissen aus Kapitel 4. Aufgrund der Funktionsintegration und der damit einhergehenden Zusammenfassung von Hauptfunktionen in reduzierter Komponentenanzahl, wurden die **Prämissen** folgend den **Einzellösungen**, **Teillösungen** und der **Gesamtlösung** zugeordnet.

5.1 Erarbeitung von Einzellösungen

Nachfolgend werden die erarbeiteten **Einzellösungen für zentrale Komponenten des Grobkonzepts** vorgestellt. Dazu gehören der **Materialspeicher und Tänzer**, der **Drehrahmen**, das **Handhabungselement** sowie die **Stapelstation**.

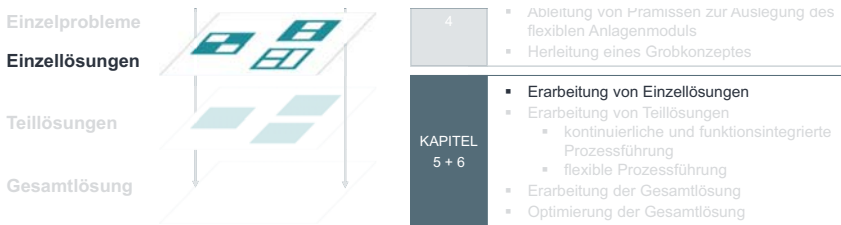


Abbildung 5-1: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 5 (Teil 1)

Die Gliederung dieses Unterkapitels orientiert sich an den eingangs genannten Komponenten. Für jede Komponente werden Anforderungen formuliert und ferner auf die detaillierte Umsetzung eingegangen. Die Anforderungen ergeben sich aus den Prämissen, experimentellen Vorversuchen sowie gesonderten technologiespezifischen Recherchen. Die CAD-Dateien zur Erstellung der folgenden Renderings basieren zu Teilen auf den angeleiteten Arbeiten von A_Kreuer (2019) und A_Schmidgruber (2020).

5.1.1 Materialspeicher und Tänzer

Die grundsätzliche Aufgabe des Materialspeichers und Tänzers besteht im **Ausgleich von Bahnzugkraft- und Bahngeschwindigkeitsschwankungen** sowie dem **Aufbringen einer definierten Bahnzugkraft**.

5.1.1.1 Anforderungen

Bei der Auslegung der beiden Komponenten sollen, neben den experimentellen Untersuchungen und technologiespezifischen Recherchen, die in Kapitel 4 abgeleiteten relevanten Prämissen berücksichtigt werden, vgl. nachstehende Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: Relevante Prämissen zur Auslegung von Materialspeicher und Tänzer

| Prämisse | |
|----------|--|
| P1-05 | Gewicht aller bewegten Teile weitestmöglich reduzieren |
| P1-09 | Entkopplung von Bearbeitungsgeschwindigkeit und Bahnzugkraft anstreben |
| P3-07 | Anlagenbedingte Längsfaltenbildung (z.B. durch Walzendurchbiegung) vermeiden |
| P3-08 | Biegeradien innerhalb der Anlage möglichst groß wählen (Materialschädigung) |
| P3-13 | Bahnzug in weitem Bereich einstellbar gestalten (Genauigkeit Vereinzeln) |

Prozessparameter - Bahnzugkraft

Grundsätzlich unterliegen alle Rolle-zu-Rolle Prozesse Bahnzugkraftschwankungen. Diese können im Prozess selbst, schlechten Rundlaufeigenschaften der Komponenten (Umlenkwalzen, Wickelwellen, Material-Coils etc.) oder auch Ungenauigkeiten in der Synchronisation der Antriebe begründet liegen. Da bereits geringe Geschwindigkeitsunterschiede zu großen Zugkraftschwankungen führen, ist der Einsatz von Ausgleichssystemen im Stand der Technik eine gängige Praxis. (Pfeiffer 1987, S. 2099)

Damit Speicher und Tänzer optimal arbeiten sind diese grundsätzlich **so leicht wie möglich** zu gestalten, denn ein hohes Gewicht führt zu Massenträgheit und einem schlechten dynamischen Ansprech- bzw. Regelverhalten des Systems. Darüber hinaus ist ein größerer Impuls notwendig um die Komponente in Bewegung zu versetzen.³

Auch die Schwerkraft beeinflusst die Regelgenauigkeit, da diese immer erst überwunden werden muss damit der Speicher bzw. Tänzer arbeitet. Die Systeme sind daher bevorzugt so zu gestalten, dass diese **nicht entgegen der Schwerkraft arbeiten**. Dies kann über Rotationstänzer oder horizontal arbeitende Lineartänzer erreicht werden.³

Materialspeicher und Tänzer sind außerdem für das Aufbringen der Bahnzugkraft zuständig. Für die papier- und folienverarbeitende Industrie gilt als Richtwert, dass die **Bahnzugkraft für eine optimale Materialführung** im Bereich zwischen **10 und 25 % der maximalen Zugfestigkeit** des Materials liegen sollte³.

³ Converter Accessory Corporation: The Mechanics of Tension Control von Jeff Damour, <https://www.converter-accessory.com/papers/tcpaper1.pdf> [abgerufen am 05.07.2021]

Aufgrund der Tendenz zur Längsfaltenbildung bei kalandrierten Elektroden unter hohem Bahnzug, vgl. Kapitel 4, soll sich die Auslegung am unteren Richtwert orientieren. Da die Zugfestigkeit im Wesentlichen durch den Stromsammelr bestimmt wird, soll dieser als Richtwert zur Abschätzung dienen. Für die gegenüber der Kathodenbahn reißfesteren Anodenbahn ($\bar{x} = 3,9 \text{ N/mm}$), ergibt sich für Bahnbreiten zwischen 25 und 200 mm ein **Kraftbereich zwischen 9,75 und 78,02 N zur optimalen Materialführung**.

Eine weitere Möglichkeit den Kraftbereich abzuschätzen besteht in der Betrachtung der **maximalen Haltekräfte, welche über den Flächengreifer aufgebracht** werden können. Basierend auf den Messungen aus Kapitel 4 und unter Berücksichtigung des Reibkoeffizienten von Aluminium, sind in Abhängigkeit von Differenzdruck, Material und Bahnbreite folgende maximalen Bahnzugkräfte erzielbar, vgl. Abbildung 5-2. Die Werte wurden analytisch hergeleitet und für unterschiedliche Differenzdrücke aufgetragen.

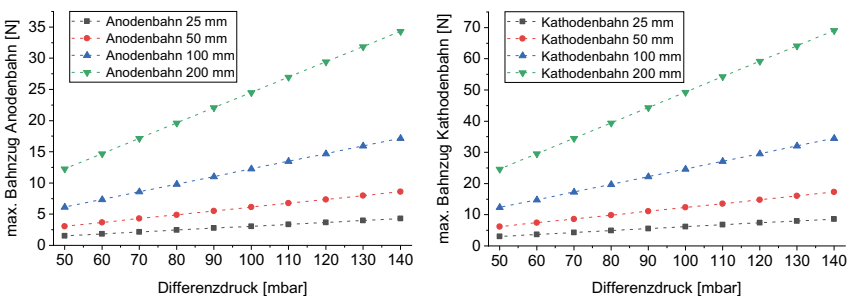


Abbildung 5-2: Abschätzung max. möglicher Bahnzugkräfte in Abhängigkeit des Differenzdrucks und Materials

Über das obige Differenzdruck-Intervall (50 bis 140 mbar) ergibt sich ein Bereich zwischen 1,53 und 69,06 N, wobei dieser über die Annahme eines **Mindestdifferenzdrucks von 80 mbar**, vgl. Kapitel 5.1.3, weiter auf **2,45 bis 69,06 N** eingegrenzt werden kann. Die Intervallobergrenze ist dabei durch die Kathodenbahn bestimmt.

Auf Basis der obigen Abschätzungen in Bezug auf die optimale Materialführung und maximal möglichen Haltekräfte, soll nachfolgend ein **Intervall von 2,45 bis 69,06 N** als Grundlage für die weitere Auslegung festgelegt werden.

Prozessparameter - Bahngeschwindigkeit

Änderungen bei der Bahngeschwindigkeit sollen grundsätzlich vermieden werden, da diese die eingangs beschriebenen Bahnzugkraftschwankungen induzieren. Zudem soll der Prozess eine Entkopplung von Bahnzugkraft- und Bahngeschwindigkeit erlauben.

Dies kann über Linearspeicher realisiert werden, welche einen Puffer zur Kompensation unterschiedlicher Bahngeschwindigkeiten innerhalb der Anlage darstellen.

Komponentendesign

Bei der Auslegung ist auf eine **ausreichende Steifigkeit der Komponenten** zu achten, um die Nachgiebigkeit im Aufbau unter der wirkenden Bahnzugkraft gering zu halten. Dies ist wichtig, um ein Mäandern der Bahn im Prozess zu vermeiden. Darüber hinaus ist auf einen **ausreichend großen Walzendurchmesser** zu achten, um Beschädigungen durch Biegebeanspruchung (z.B. Rissbildung) vorzubeugen.

5.1.1.2 Umsetzung

Materialspeicher

Gemäß der gängigen Praxis, wird ein horizontal arbeitender Linearspeicher eingesetzt, welcher nicht entgegen der Schwerkraft arbeitet – vgl. Abbildung 5-3. Der Speicher besteht aus insgesamt fünf Umlenkwalzen, zwei beweglichen und drei ortsfesten. Die beiden beweglichen Umlenkwalzen sind auf einer Aufnahme montiert, welche über zwei Linearführungen an die Maschinengrundplatte angebunden ist. Die Aufnahme selbst hat einen durch Anschläge begrenzten Verfahrweg von 160 mm, wodurch der Speicher bis zu 640 mm (4 x 160 mm) Material vorhalten kann.

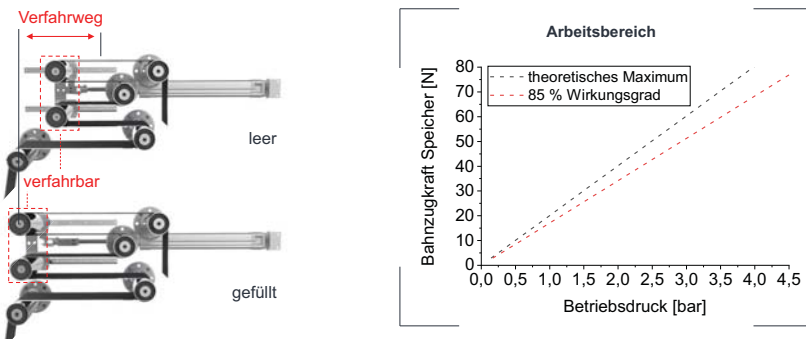


Abbildung 5-3: Materialspeicher in entleertem (oben links) und gefülltem (unten links) Zustand und Abschätzung des Arbeitsbereichs (rechts)

Als Aktor zum Ansteuern der beweglichen Umlenkwalzen wird ein Kolbenstangenzylinder (AirTec XL-032-160) verwendet. Unter der Annahme eines 85%-igen Wirkungsgrades und einem verfügbaren Mindestbetriebsdruck von 4,5 bar, entspricht der Arbeitsbereich dem eingangs festgelegten Auslegungsintervall, vgl. Abb. 5-3 rechts.

In Bezug auf das Komponentendesign wurde auf eine leichtgewichtige Ausführung sowie einen ausreichend großen Walzendurchmesser von 50 mm geachtet. Dieser wird weiterhin an keiner Stelle in der Anlage unterschritten. Die Umlenkwalzen sind zudem über Feingewinde in deren Hoch- und Querachse einstellbar.

Tänzer

Analog zum Materialspeicher wurde auch der Tänzer so ausgeführt, dass dieser nicht entgegen der Schwerkraft arbeitet, siehe Abbildung 5-4. Zum Einsatz kommt ein Rotationstänzer, welcher durch eine geringe Trägheit gekennzeichnet ist, um so einen dynamischen Ausgleich von Bahnzugschwankungen zu ermöglichen⁴. Rotationstänzer verfügen über eine sehr geringe Speicherkapazität, hier etwa 80 mm, weshalb diese meist in Kombination mit Linearspeichern eingesetzt werden.

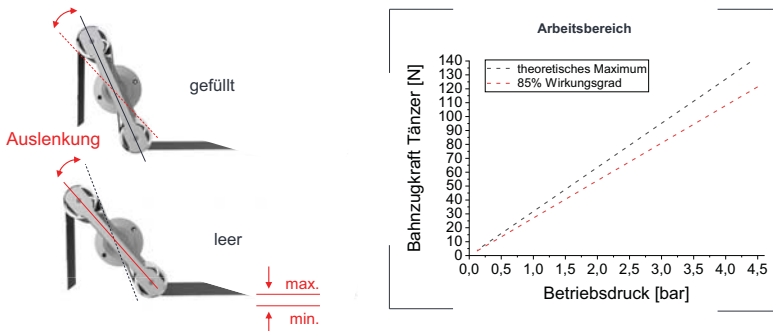


Abbildung 5-4: Tänzer im nicht ausgelenktem (oben links) und ausgelenktem (unten rechts) Zustand und Abschätzung des Arbeitsbereichs (rechts)

Zur Ansteuerung des Tänzers wurde ein Rundschwenkzylinder (Festo DRVS-40-270-P) gewählt. Unter der Annahme eines ebenfalls 85%-igen Wirkungsgrades und einem max. Betriebsdruck von 4,5 bar, deckt dessen Arbeitsbereich das eingangs gewählte Auslegungsintervall hinreichend ab.

⁴ Converter Accessory Corporation: The Mechanics of Tension Control von Jeff Damour, <https://www.converter-accessory.com/papers/tcpaper1.pdf> [abgerufen am 05.07.2021]

Hinsichtlich der Materialführung ist darauf zu achten, dass die Materialbahn einen wesentlichen Teil der Umlenkwalzen des Tänzers umschlingt, um keinen Schlupf zwischen Walze und Materialbahn zu induzieren (Pfeiffer 1987, S. 2095). Dies gilt insbesondere für die maximale Auslenkung des Tänzers. Diese wurde mechanisch durch Anschläge begrenzt, um die Höhe der auslaufenden Materialbahn unterhalb eines definierten Maximums zu halten, vgl. Abbildung 5.4 links. Dies ist notwendig, um ein Abschälen des Materials vom Greifer und damit einen Haltekraftverlust zu vermeiden.

Umlenkwalzen

Wie in den Anforderungen beschrieben, ist die Ausrichtung der Umlenkwalzen zueinander wesentlich. Eine hohe Bahnzugkraft kann diese, insbesondere bei einseitiger Anflanschung, negativ beeinflussen. Entscheidend dabei ist die Durchbiegung der starren Achse, auf welcher der Walzenmantel über Kugellager gelagert ist.

Die Durchbiegung soll folgend für eine Aluminium- und Stahlachse mit 20 mm Durchmesser und 318 mm Länge, in Abhängigkeit verschiedener Bahnzugkräfte und Bahnbreiten, abgeschätzt werden. Für die Durchbiegung d von Achsen aus mehreren Trägerteillängen und Vollmaterial gilt

$$d = \frac{F_E}{3 * E} * \left(\sum_{i=1}^5 \frac{h_i^3}{J_{d_i}} \right) \quad 5-1$$

mit F_E für die wirkende Ersatzkraft am Ende der Achse, h_i für den Hebel des Achsabschnittes, E für den Elastizitätsmodul und J_{d_i} für das Flächenmoment 2. Grades in Abhängigkeit des Achsdurchmessers d_i für rundes Vollmaterial im entsprechenden Achsabschnitt⁵.

Die nachfolgende Abbildung 5-5 veranschaulicht die berechnete Durchbiegung für eine Achse aus Stahl (E-Modul $\approx 210000 \text{ N/mm}^2$) und Aluminium (E-Modul $\approx 70000 \text{ N/mm}^2$). Die entsprechende Ersatzkraft F_E am Ende der Achse wurde dazu in Abhängigkeit der Bahnzugkraft F_B , dem Abstand a_G der Bahnkante zur Grundplatte (100 mm) sowie der Bahnbreite b berechnet. Diese wurde anschließend in die obige Formel eingesetzt, um das Diagramm in Abbildung 5-5 rechts zu erzeugen.

⁵ Hochschule Anhalt: Maschinenelemente – Wellen und Achsen, https://www.hs-anhalt.de/fileadmin/Daten/FB6/personen/voigt_st/Lehrunterlagen/01_ME_Vorlesung/06_ME_Wellen_und_Achsen_Stud.pdf [abgerufen am 28.09.2021]

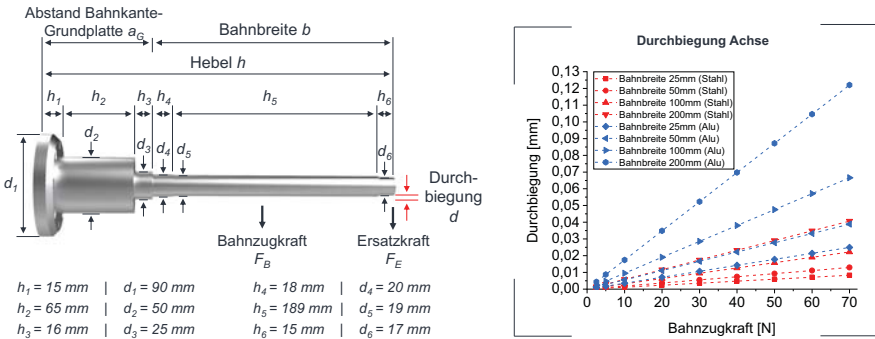


Abbildung 5-5: Abschätzung der max. Durchbiegung einer einseitig gelagerten Achse in Abhängigkeit des Werkstoffs und der wirkenden Bahnzugkraft

Die errechnete Durchbiegung für Stahlachsen liegt um den Faktor drei unterhalb der von Aluminiumachsen, das Gewicht allerdings etwa um den Faktor drei darüber (Stahl $\sim 7,9 \text{ g/cm}^3$ Aluminium $\sim 2,7 \text{ g/cm}^3$). Um sowohl der Durchbiegung als auch dem dynamischen Regelverhalten gerecht zu werden, wurden alle **feststehenden Umlenkwalzen mit Stahlachsen** und alle **beweglichen Umlenkwalzen mit Aluminiumachsen** ausgeführt. Da sich die **Walzenmäntel** in allen Fällen bewegen, wurden diese für alle Umlenkwalzen in 3,5 mm starken **Aluminium** ausgeführt.

5.1.2 Drehrahmen

Eine grundlegende **Aufgabe** in Rolle-zu-Rolle Anlagen besteht darin, die Materialbahn durch den Prozess zu bewegen und deren laterale Position dabei konstant zu halten. Ungenauigkeiten durch Coils (z.B. Aufwickelgenauigkeit) und geometrische Defekte (z.B. Camber) stellen ungewollte Störkräfte dar, welche dazu führen, dass die Materialbahn kontinuierlich von der für sie bestimmten Idealposition abweicht. Die Aufgabe des Drehrahmens besteht deshalb in der **Korrektur** der **lateralen Position der Materialbahn**, meist unmittelbar vor der Übergabe an einen qualitätskritischen Prozessschritt, um dort die höchstmögliche Genauigkeit zu erzielen. (Benson 2002, S. 25)

Die **Funktionsweise des Drehrahmens** beruht auf dem Prinzip, dass eine Materialbahn, welche sich einer Umlenkwalze nähert danach strebt, sich senkrecht zu deren Drehachse auszurichten. Durch ein Verdrehen einer Walze bzw. eines Walzenpaares

kann folglich eine Korrektur der Bahnposition auf die nachfolgende Walze (auch als Fixierwalze bezeichnet) erreicht werden. (Seshadri & Pagilla 2009, S. 1)

Zur Umsetzung dieses Prinzips sind am Markt diverse Bahnlaufregelsysteme verfügbar. Diese lassen sich in RPG- („remotely-pivot guide“) und OPG-Bahnlaufregelsysteme („offset-pivot guide“) unterteilen (Shelton 1968, S. 5). **RPG-Systeme** bezeichnen Aufbauten, in denen ein Walzenpaar eine Drehbewegung zwischen zwei parallelen vor- und nachgelagerten Führungswalzen ausführt. **OPG-Systeme** sind RPG-Systemen ähnlich, allerdings liegt der Drehpunkt hier im Einlaufbereich, wodurch die Verformung der Materialbahn in der Einlaufspanne deutlich geringer ausfällt und diese so verhältnismäßig kurz sein kann (Shelton 1968, S. 7). OPG-Systeme eignen sich deshalb besonders gut für kompakte Bauräume (Shelton 1968, S. 10) und darüber hinaus besser zum Ausgleich kontinuierlicher Abweichungen (z.B. Camber) (Pfeiffer 1987, S. 2096).

5.1.2.1 Anforderungen

In diesem Abschnitt sollen die Anforderungen an die Verstellmöglichkeiten von Drehrahmen und Sensor, die Regelgenauigkeit sowie die max. Bahnzugkraft unter Berücksichtigung der folgenden Prämissen berücksichtigt werden.

Tabelle 5-2: Relevante Prämissen zur Auslegung des Drehrahmens

| Prämisse | |
|----------|---|
| P2-06 | Sensorpositionen möglichst formatunabhängig wählen |
| P2-11 | Anlagenparameter (z.B. Einlauf-/Auslaufänge) sollen materialabhängig wählbar sein |
| P3-01 | Ausrichtgenauigkeit soll weitestgehend materialunabhängig sein |
| P3-06 | Optische Ausrichtsysteme verwenden (höhere Genauigkeit) |
| P3-13 | Bahnzug in weitem Bereich einstellbar gestalten (Genauigkeit Vereinzelung) |
| P3-16 | Elektrodenbahn an Schnittkante (nicht Beschichtungskante) ausrichten |

Die wichtigste Kennzahl des Drehrahmens ist dessen Ausrichtgenauigkeit, die neben der Wahl des Sensortyps auch von der freien Einlaufänge bzw. Auslaufänge abhängt. Ein- und Auslaufänge sind ferner materialabhängig und deshalb stets optimal in Abhängigkeit des Materials zu wählen.

Anlagenparameter

Die Ausrichtgenauigkeit soll weitestgehend materialunabhängig sein, was die Möglichkeit einer unabhängigen Parameterwahl voraussetzt. Die Gestaltung der **Ein- und Auslaufänge** hängt von der erforderlichen Korrekturbewegung, der Bahnzugkraft, dem

Elastizitätsmodul und der Bahnbreite ab und muss entsprechend **an die Material- und Prozessbedingungen angepasst werden können**.⁶

Komponentenauswahl/-design

Die **Erfassung der Bahnposition** soll **formatunabhängig** geschehen und es sollen keine zeitaufwendigen Rüstvorgänge erforderlich sein. Die Erfassung soll **an der Bahnkante** und nicht an der Beschichtungskante erfolgen, um Ungenauigkeiten durch Beschichtungsüberhöhungen und auslaufende Geometrien zu vermeiden.

Die Bahnposition soll mittels **optischem Sensor** erfasst werden, der in Kombination mit der Drehrahmen-Verstelleinheit hinreichend genau ist, um eine Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm bei der Ausrichtung der Materialbahnen zu erreichen. Der Drehrahmen soll **für den eingangs definierten Kraftbereich geeignet** sein, um die Bahnposition stets optimal regeln zu können.

5.1.2.2 Umsetzung

Gemäß den Anforderungen kann die Ein- und Auslauflänge an die Materialgegebenheiten (z.B. Bahnbreite, Elastizitätsmodul) und Prozessbedingungen (z.B. Bahnzugkraft) angepasst werden. Dazu wurde der Drehrahmen an einer Aufnahme montiert, welche über zwei Linearführungen geführt und über eine Trapezgewindespindel in der Höhe verstellt werden kann, vgl. Abbildung 4-42 und 5-6. Zur Erfassung der Bahnkante wurde ein Infrarot-Breitband Sensor gewählt, welcher direkt an der Aufnahme des Drehgestells montiert ist und dadurch stets synchron mit dem Drehrahmen in dessen Höhe verfährt.

Der Kantensensor ist zur Maschinengrundplatte hin montiert und erfasst die Bahnkante in einem Abstand von 100 mm zur Grundplatte. Dieser Abstand gilt unabhängig von der zu verarbeitenden Bahnbreite und dient als Referenz für alle zu verarbeitenden Materialien. Der Abstand ändert sich durch die Höhenverstellung des Drehrahmens nicht, zu beachten sind lediglich die Fertigungstoleranzen von Linearführung und Grundplatte. Diese liegen jedoch in einer vernachlässigbaren Größenordnung ($< 3,5 \mu\text{m}$ für Präzisionsklasse P kleiner gleich 400 mm Länge)⁷.

⁶ Erhardt+Leimer: Systeme zur Bahnlaufregelung, <https://www.erhardt-leimer.de/produkte/bahnlauftechnik/bahnlaufregelsysteme> [abgerufen am 29.09.2021]

⁷ THK – Ermittlung der Genauigkeit, https://tech.thk.com/de/products/pdf/de_a01_077.pdf

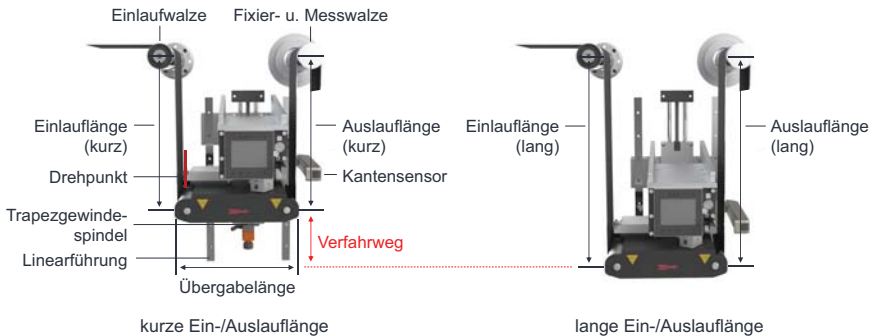


Abbildung 5-6: Drehrahmen mit kurzer (links) und langer (rechts) Ein-/Auslauflänge

Die Regelgenauigkeit des Drehrahmens (Erhardt+Leimer DR2275) wird herstellereitig mit $\pm 0,1$ mm angegeben, wobei ausdrücklich auf die Materialabhängigkeit der Angabe verwiesen wird. Der Drehrahmen kann Bahnzugkräfte bis max. 100 N aufnehmen, die kombinierte Fixier- und Messwalze bis max. 80 N. Die Komponentenauswahl steht folglich im Einklang mit der anfänglichen Anforderungsdefinition.

Die beiden Umlenkwalzen des Drehrahmens sowie die Messwalze wurden analog zu den Führungswalzen in einem Durchmesser von 50 mm ausgeführt. Für eine kompakte Bauweise wurde der Drehrahmen in Kompaktausführung und mit Drehpunkt im Einlaufbereich (OPG-System) gewählt, da sich dieser gut für Bahnen mit Camber eignet.

5.1.3 Handhabungselement

Das Handhabungselement stellt eine zentrale Komponente des flexiblen Anlagenmoduls dar, denn es integriert die Funktionen Halten, Formändern und Lösen in einer zentralen Komponente und ist deshalb maßgeblich für die Prozesssicherheit sowie Qualität der Zwischenerzeugnisse (Elektrodeneinzelblätter) verantwortlich.

5.1.3.1 Anforderungen

In diesem Abschnitt sollen die **Anforderungen** an das Handhabungselement auf Grundlage der Prämissen formuliert werden, vgl. Tabelle 5-3. Aufgrund der zentralen Rolle des Handhabungselementes wurde dessen Funktionsweise am realen Bauteil im Hinblick auf die Dimensionierung des Ejektors, den resultierenden Differenzdruck an der Wirkfläche sowie die Auswirkung von Nebenluft abgesichert.

Tabelle 5-3: Relevante Prämissen zur Auslegung des Handhabungselements

| Prämisse | |
|----------|---|
| P1-07 | Schnellen Austausch der Schneidwerkzeuge ermöglichen |
| P2-08 | Niederhalter sollen unabhängig von Bahnbreite und Beschichtungsdicke zur Stabilisierung des Schnittes wirken können |
| P3-02 | Auf teillächige Greifer wegen Abschälereffekten und Unterdrucküberhöhung verzichten |
| P3-03 | Als Greifer-Typ Niederdruckflächensauger einsetzen (reinigend, schonend) |
| P3-04 | Lochdurchmesser am Flächengreifer möglichst optimal (klein) wählen |
| P3-09 | Hartstahlmesser für das Ablängen verwenden |
| P3-11 | Differenzdruck am Greifer möglichst gering wählen (Materialbeschädigung) |
| P3-14 | Vorspannung von Ober- und Untermesser ermöglichen (Schnittkantenqualität) |
| P3-18 | Abschälereffekte am Greifer (z.B. durch Überhang) vermeiden |
| P3-26 | Ableiterföhnchen nicht durch Flächengreifer ansaugen (Beschädigungen) |
| P3-28 | Ablängvorgang durch Scherschneiden umsetzen (vergl. Qualität Schnittkanten) |
| P3-29 | Elektrodenbahn beim Schneiden fixieren (Stabilisierung Schneidprozess) |

Komponentendesign

Gemäß den Prämissen wird ein **Niederdruckflächengreifer** zur Handhabung der Elektroden **eingesetzt**. Dieser gilt, aufgrund der gleichmäßigen Kraftverteilung zwischen Elektrode und Greifer, als besonders materialschonend (Götz 1991, S. 25). Zudem besitzt er, wie in Kapitel 2 beschrieben, einen reinigenden Effekt welcher sich positiv auf die Prozessqualität auswirkt. Das **Lochmuster** des Greifers soll, gemäß der Untersuchungen in Kapitel 4, möglichst **fein gewählt** werden, da dies höhere Haltekräfte bei gleichem Differenzdruck ermöglicht und so Beschädigungen an Materialien geringer Biegesteifigkeit vorbeugt (Reinhart & Straßer 2011, S. 304).

Es soll ein Greifer verwendet werden, bei dem das **Material nicht seitlich herunterhängt** um Abschälereffekte und die Notwendigkeit zur Unterdrucküberhöhung zu vermeiden. Das **Ableiterföhnchen** darf aufgrund von Beschädigungen durch den wirkenden Unterdruck **nicht angesaugt** werden.

Entsprechend den Prämissen soll das **Ablängen** der Elektrodenbahn **durch Scherschneiden** erfolgen. Dazu sollen **Hartstahlmesser** zum Einsatz kommen, welche gegeneinander **vorgespannt** werden können. Während des Schneidens soll die **Elektrodenbahn fixiert** werden, um den Schnitt zu stabilisieren und eine hohe Schnittqualität zu ermöglichen. Der Mechanismus soll unabhängig von der Elektrodenbahnbreite wirken. Ein **Werkzeugtausch** soll **innerhalb kurzer Zeit** möglich sein, um die Stillstandszeit zu minimieren.

5.1.3.1 Umsetzung

Gemäß den Anforderungen wird ein Niederdruckflächensauger zur Handhabung der Elektrodenbahnen und -blätter eingesetzt. Dazu wird nachfolgend näher auf die erzielbaren Differenzdrücke, die aktive Wirkfläche, die Geometrie des Handhabungselementes sowie den Schneidmechanismus eingegangen.

Differenzdruck und Wirkfläche

Zur Erzeugung des Differenzdrucks und zur Vermeidung eines plötzlichen Unterdruckabfalls bei Nebenlufteinbruch wurde ein Ejektor mit hohem Volumenstrom gewählt, wie in Götz 1991 empfohlen (S. 54–55). Dabei handelt es sich um einen Förderejektor der Fa. Schmalz (SEC-100), der sich aufgrund des hohen Sauvermögens von max. 36,6 m³/h besonders gut für poröse Materialien eignet⁸.

Um Strömungswiderstände durch Leitungen zu minimieren und eine möglichst schnelle Evakuierung des Greifers zu ermöglichen, ist der Förderejektor direkt am Handhabungselement angeflanscht (Götz 1991, S. 54). Für die Dauer der Evakuierung t_1 bis zum vorgegebenen Differenzdruck Δp_1 gilt nach Götz (1991, S. 56)

$$t_1 = -\ln\left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p}\right) * \left(\frac{V_G}{\dot{V}_p}\right) \quad 5-2$$

mit Δp_1 für den End-Differenzdruck, Δp für den anliegenden Differenzdruck, V_G für das zu evakuierende Greifervolumen und \dot{V}_p das zu evakuierende Volumen zwischen Ejektor zum Greifer. Die Gleichung veranschaulicht den **Vorteil geringer Differenzdrücke und kurzer Zuleitungen** (geringes Volumen), was für den zugrundeliegenden Aufbau von hoher Relevanz ist, um hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten – sprich ein schnelles Aktivieren und Deaktivieren des Vakuums – zu ermöglichen.

Zur schnellen Wiederherstellung des atmosphärischen Drucks bzw. eines Überdrucks im Handhabungselement, verfügt dieses weiterhin über zwei zusätzliche Druckluftanschlüsse, vgl. Abbildung 5-7 links.

⁸ Schmalz Förderejektor – SEC 100, https://pimmedia.schmalz.com/Dokumente/Bedienungsanleitung/30/3030/303001/30300100022/BAL_30.30.01.00022_de-DE.pdf

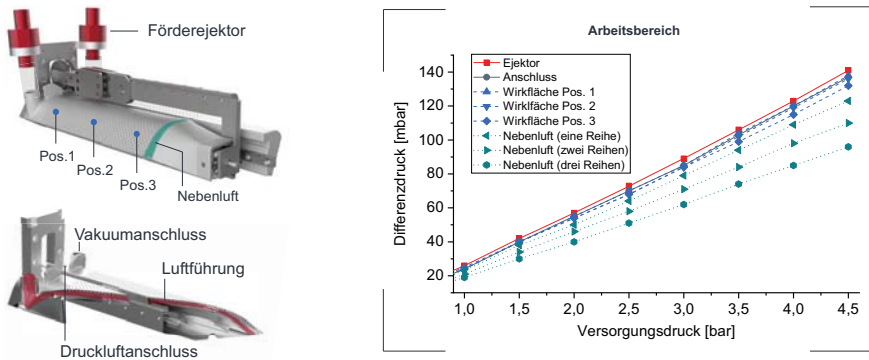


Abbildung 5-7: Messung des Differenzdrucks in Abhängigkeit der Position und etwaiger Nebenluft am Handhabungselement

Das Lochmuster der Wirkfläche ist gemäß den Anforderungen mit einem Durchmesser von ~ 1 mm sehr fein ausgeführt. Dies begünstigt einerseits eine in Relation zum Differenzdruck hohe Haltekraft, vgl. Kapitel 4, und andererseits eine Begrenzung der Leckströmung (Götz 1991, S. 73) für den Fall, dass die Materialbahn durch Mäandern nicht alle aktiven Lochreihen vollständig abdeckt. Die Auswirkung von Nebenluft durch offene Lochreihen wurde experimentell untersucht, vgl. Abbildung 5-7 rechts. Dabei zeigt sich, dass der Differenzdruck bei einem Versorgungsdruck von 4,5 bar und drei offenen Lochreihen niemals unterhalb von 80 mbar liegt, wodurch ein Mindestmaß an Prozesssicherheit gewährleistet werden kann.

Die Wirkfläche des Handhabungselementes beträgt $122,9 \text{ cm}^2$, der Lochflächenanteil $7,4 \text{ cm}^2$ was einem Anteil von 6 % entspricht. Dieser verhältnismäßig hohe Anteil ist vorteilhaft in Bezug auf eine homogene Unterdruckverteilung zwischen Elektrode und Greifer. Abbildung 5-7 zeigt weiterhin, dass die Homogenität des Differenzdrucks auch über die Saugfläche hinweg gewährleistet ist, vgl. Messposition 1 bis 3 für Differenzdruckmessungen an der Wirkfläche.

Geometrie Handhabungselement

Ein wichtiger Aspekt in Bezug auf das Greifer-Design ist die Vermeidung von Abschäl-effekten, durch die **Biegesteifigkeit** des Materials beim Zwingen um einen Radius und den **Materialüberstand** (Herunterhängen) bei teilflächigen Greifern.

Nach Götz (1991, S. 170) ist im Hinblick auf die Greifer-Gestaltung zu prüfen, ob angespannte Längen zwischen den Sauglöchern zulässig sind. Der Stand der Technik

sowie die Untersuchungen in Kapitel 4 verdeutlichen, dass ein vollflächiges Greifen unkontrollierte Bereiche verhindert und folglich vorteilhaft ist.

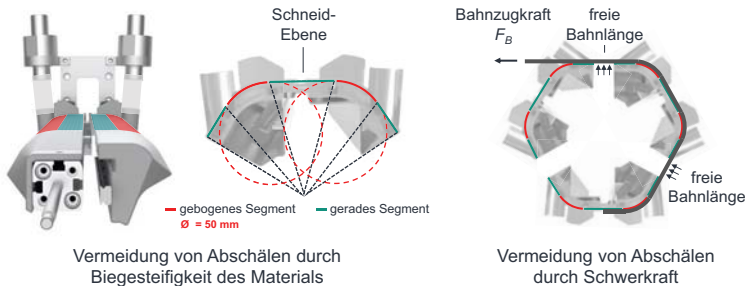


Abbildung 5-8: Segmente und Radien des Greifers (Handhabungselement)

Zur Vermeidung des Abschälens durch hohe Biegesteifigkeit wurde der Greifer in einer speziellen Sonderform ausgeführt, in der zu Beginn und Ende jedes gebogenen Segmentes (rot) ein gerades Segment (grün) angrenzt. Die geraden Segmente haben einen Anteil von 47,4 % an der Gesamtwirkfläche des Handhabungselementes und dienen der Erhöhung der Greif- und Haltesicherheit um den Radius.

Darüber hinaus wird das Material im Prozess stets so geführt, dass die Bahnzugkraft die Materialbahn zwischen den Handhabungselementen spannt und so ein Herunterhängen bzw. Abschälen durch Schwerkraft, trotz teilflächigem Greifen, verhindert wird – mehr dazu in Kapitel 5.2.1.

Schneidmechanismus

Das Problem bei dünnen Bahnmaterialien liegt in deren Tendenz zur Längsfaltenausbildung. Bei Applikationen in denen das Elektrodenblatt aus einer freien Bahnlänge herausgetrennt wird, spiegeln sich Maßabweichungen durch Faltenbildung unmittelbar in Nennmaßabweichungen der Einzelelektrode wider, vgl. Kapitel 4. Der Schnitt im dargestellten Modul erfolgt deshalb stets in einem geraden und gestützten Segment (grün) des Handhabungselementes, in welchem im Allgemeinen wenig bis keine Falten auftreten, da das Material dort eine Kraft (durch Bahnzug) gegen die Komponente erfährt.

Der Schnitt erfolgt weiterhin verschnittfrei, unter vollständiger Materialausnutzung und gemäß der in Kapitel 4 beschriebenen optimalen Fertigungsreihenfolge. Die Elektrodenbänder sind prinzipiell gut trennbar und Technologien wie das **Scherschneiden mittels Kreismesser** (z.B. beim Längsschneiden) für dünne Bahnmaterialien industriell

etabliert (Feiler 1970, S. 22). Aus diesem Grund wird nachfolgend lediglich auf das Wirkprinzip beim „Kreismesser-Scherschneiden“ sowie dessen **technologisch relevante Kenngrößen** eingegangen – nämlich Überdeckung U , Eingriffswinkel φ , Schränkungswinkel ψ , Voreilung ΔV , Schneidspalt a und Anlagekraft F_{An} (Feiler 1970, S. 48).

Erläuterung des Verfahrens

Das Kreismesser-Scherschneiden beschreibt ein Verfahren, in welchem ein Werkstück zwischen zwei sich aneinander vorbeibewegenden Schneiden zerteilt wird (DIN 2003b, S. 3). Dazu wird ein Kreismesser – axial federnd – gegen ein Gegenwerkzeug (z.B. Rund- oder Langmesser) angestellt (Feiler 1970, S. 23). Der Trennvorgang erfolgt durch induzierte Spannungen im Schnittgut, welche letztlich zu einer Erschöpfung des Formänderungsvermögens des Werkstoffes und so zu dessen Zerteilung führen (Feiler 1970, S. 40–41). Es kann dabei zu einem Zustand kommen, in welchem ein Riss dem eigentlichen Schneidkeil vorausläuft, wodurch die Trennflächenqualität vielmehr durch die Feinstruktur des Materials und weniger durch die Schneiden selbst bestimmt ist (Feiler 1970, S. 80). Die Reißphase hängt insbesondere von der Sprödhheit des Werkstoffes ab und wird durch das Material (z.B. Anode und Kathode) und dessen Bearbeitungszustand (z.B. Trocknung, Kalandrierung) beeinflusst.

Hinsichtlich der **technologischen Größen** sind der Schränkungswinkel der Klinge, der Schneidspalt sowie die Anlagekraft über den Verstellmechanismus veränderlich, wohingegen die anderen drei Schneidparameter geometrisch über die Auslegung definiert sind. Nachfolgend werden die Einflüsse der technologischen Kenngrößen, vgl. Abbildung 5-9, sowie deren Spezifikation für das Anlagenmodul genauer erläutert.

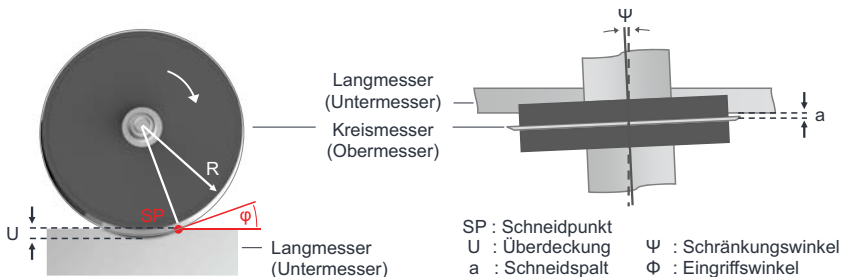


Abbildung 5-9: Technologische Kenngrößen des Kreismesser-Scherschneidens
(Eigene Darstellung nach (Feiler 1970, S. 138))

Schränkungswinkel ψ

Da der Rundlauf aufgrund von Toleranzen und wirkender Anlagekraft nie absolut ideal ist, entspricht die Bewegung des Kreismessers in Realität einer Taumelbewegung. Diese führt zu Instabilitäten in Bezug auf den Schneidpunkt SP und somit zu schwankenden Schnittqualitäten entlang der Schneidkante (Feiler 1970, S. 117). Durch eine Schränkung wird eine stetige Punktberührung der beiden Werkzeuge und somit eine Stabilisierung des Schneidpunktes erreicht (Feiler 1970, S. 49).

Der Schränkungswinkel ist für ein Rundmesserpaar definiert als „der Winkel, den die Achsen zusammenwirkender Schneidwerkzeuge miteinander einschließen“ (Feiler 1970, S. 29). Für die Kombination aus Rund- und Langmesser ist dies der Winkel, welcher die Achse des Kreismessers und die Orthogonale zur Schneidfläche des Langmessers einschließt. Die Größe des Schränkungswinkels richtet sich nach dem Rundlauf der Werkzeuge und bewegt sich üblicherweise **im Bereich zwischen 0,05 und 0,5°** (Feiler 1970, S. 117). Zu große Schränkungswinkel sind zu vermeiden, da diese zu einer Verringerung der Schnittqualität (z.B. Zipfelbildung) führen (Feiler 1970, S. 117).

Schneidspalt a

Der Schneidspalt ist definiert als „der Abstand der Schneidebenen zusammenwirkender Werkzeuge im Schneidpunkt“ (Feiler 1970, S. 50). Um zu verhindern, dass das Schnittgut beim Schneiden in den Spalt eingezogen wird, muss dieser kleiner sein als die Schnittgutdicke (Feiler 1970, S. 115). Aufgrund der eingangs beschriebenen Taumelbewegung ist ein präzises Einstellen des Schneidspalts für sehr dünne Materialien (z.B. Kollektorfolien) i.A. nicht möglich und würde zu stark schwankenden Schnittqualitäten führen, weshalb für dünne und weiche Materialien stets ein **Nullspalt** gewählt wird (Feiler 1970, S. 115). Die Messer werden dazu über eine Feder vorgespannt.

Anlagekraft F_{An}

Die Anlagekraft ist definiert als „die Kraft, mit der das Obermesser federnd am Untermesser anliegt“ (Feiler 1970, S. 50). Sie verhindert die Entstehung eines Schneidspalts durch die im Schneidprozess wirkenden Kräfte und vorhandene komponentenseitige Toleranzen (Feiler 1970, S. 50). Die **Anlagekraft** muss folglich mindestens **so groß** sein, **dass kein Schneidspalt** durch die wirkenden Prozesskräfte **entsteht**.

Überdeckung U

Die Überdeckung oder auch Eintauchtiefe ist der maximale Abstand der Schneidkanten zwischen Ober- und Untermesser in deren Eingriffsbereich. Sie ist zwingend notwendig um einen scherenenden Trennvorgang auszuführen und muss groß genug sein, dass ein „Auflaufen“ des Obermessers auf das Untermesser verhindert wird (Feiler 1970, S. 48–49). Gleichsam darf die Überdeckung nicht zu groß sein, da es sonst zu einer Zipfel- und Sickenbildung im Schnittbereich kommen kann (Feiler 1970, S. 115).

Für Folienstärken im Bereich von 125 bis 175 µm gibt Feiler eine **Überdeckung unterhalb von 0,5 mm** als optimalen Anlagenparameter an (Feiler 1970, S. 116).

Voreilung ΔV

Unter Voreilung wird die „Differenz der Umfangsgeschwindigkeiten zweier zusammenwirkender Werkzeuge“ verstanden (Feiler 1970, S. 31). Ihr wird in der papier- und folienverarbeitenden Herstellung ein signifikanter Einfluss auf die entstehenden Schnittqualitäten beigemessen (Feiler 1970, S. 50). In industriellen Anwendungen gilt eine **Voreilung im Bereich zwischen 3 bis 5 Prozent** als üblich (Feiler 1970, S. 50). Die prozentuale Voreilung des Kreismessers v_K lässt sich für den Aufbau in Abbildung 5-10 wie folgt berechnen:

$$v_K = \frac{u_K - u_N}{u_N} \tag{5-3}$$

Mit u_K für den Umfang des Kreismessers und u_N für den Umfang des Niederhalters.

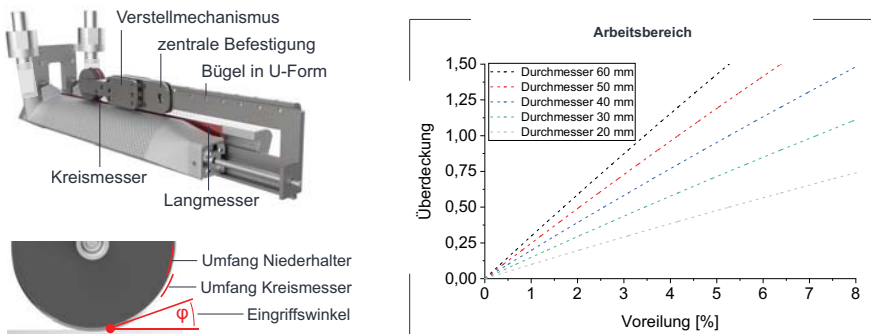


Abbildung 5-10: Aufbau der Schneideinheit am Handhabungselement (links) sowie Zusammenhang zwischen Überdeckung, Kreismesser-Durchmesser und Voreilung

Eingriffswinkel φ

Der Eingriffswinkel ist definiert als „der Winkel den die Tangenten an Schnittgut und Schneide im Schneidpunkt einschließen“ (Feiler 1970, S. 49). Mit steigendem Eingriffswinkel nimmt auch der Schneidwiderstand zu, was zu einem Flattern des Schneidwerkzeugs und gezackten Schnittflächenverläufen führen kann (Feiler 1970, S. 128–129). Bei großen Eingriffswinkeln kann es gar zu einer Wölbung des Schnittgutes vor der Schneide kommen, weshalb der **Eingriffswinkel stets kleiner 75°** gewählt werden sollte (Feiler 1970, S. 129). Der Eingriffswinkel φ lässt sich über die folgenden geometrischen Zusammenhänge, wie in Abbildung 5-11 links dargestellt, berechnen:

$$S = 2 * \sqrt{U * (2 * R - U)} \quad 5-4$$

$$\alpha = 2 * \text{asin} \left(\frac{S}{2 * R} \right) \quad 5-5$$

$$\beta = 180^\circ - \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad 5-6$$

$$\varphi = 90^\circ - \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad 5-7$$

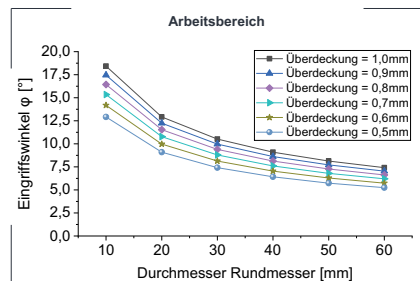
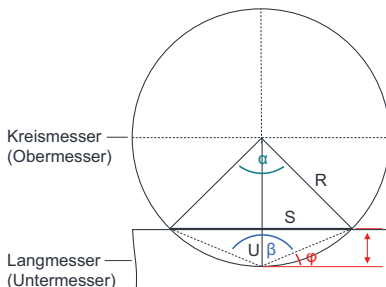


Abbildung 5-11: Zusammenhang zwischen Eingriffswinkel, Rundmesser-Durchmesser und Überdeckung

Flexibilität bzw. Formategebundenheit

Das Scherschneiden mittels Kreis- und Langmesser ist nicht formgebunden. Die Schneidbewegung bestimmt den Verlauf der Schnittfläche und nicht die Geometrie des Werkzeugs, wodurch das Verfahren gut für den Zuschnitt variabler Bahnbreiten geeignet ist. (Feiler 1970, S. 22)

Werkzeugwechselzeit

Aufgrund der Relativbewegung zwischen Messer und Schnittgut bzw. zwischen den Messern (Kreismesser-Langmesser) entsteht Verschleiß. Dieser führt zu einer abnehmenden Schneidfähigkeit und einer Reduzierung der Schnittqualität. Folglich ist ein regelmäßiger Wechsel der Schneidwerkzeuge notwendig, wobei es insbesondere die **Werkzeugwechselzeiten** und weniger die Werkzeugkosten sind, die sich **nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit** der Fertigung auswirken. (Feiler 1970, S. 93)

Auslegung des Schneidmechanismus

Hinsichtlich der Auslegung muss, wie eingangs beschrieben, zwischen den veränderlichen und unveränderlichen technischen Kenngrößen unterschieden werden.

Durch Einstellung veränderlich sind der Schränkungswinkel, der Schneidspalt und die Anlagekraft. Der Schränkungswinkel soll gemäß der technologiespezifischen Recherche im Bereich zwischen 0,05 und 0,5° frei verstellbar sein. Aufgrund der geringen Materialstärken soll mit einem Nullspalt gearbeitet werden, wodurch auf eine Positionseinstellung des Kreismessers in axiale Richtung verzichtet werden kann und eine Justierbarkeit der Anlagekraft ausreicht. Die Anlagekraft kann dabei über den Verstellmechanismus durch eine Vorspannung des Bügels in U-Form, welcher als Feder agiert, aufgebracht werden, vgl. Abbildung 5-10.

Durch das Komponentendesign unveränderlich festgelegt sind die Überdeckung, die Voreilung und der Eingriffswinkel. Diese drei Kenngrößen stehen in Abhängigkeit zueinander. Zur Realisierung einer Voreilung im Bereich zwischen 3 und 5 Prozent sind bei einer Überdeckung kleiner 0,5 mm nur Kreismesser-Durchmesser unterhalb von 40 mm möglich, vgl. Abbildung 5-10. Die Reduzierung des Kreismesser-Durchmessers führt allerdings zu einem exponentiellen Anstieg des Eingriffswinkels, weshalb ein Durchmesser von 40 mm für das Kreismesser gewählt wird. Das Kreismesser ist gemäß den Anforderungen in Hartstahl ausgeführt.

Unabhängig von den technischen Kenngrößen, aber wichtig für eine hohe Schnittqualität, ist der Niederhalter. Das Niederhalten erfolgt, wie eingangs erwähnt, zum einen über den Niederdruckflächengreifer des Handhabungselements und zum anderen über den kreisförmigen Niederhalter, welcher auch dem Antrieb des Kreismessers dient. Beide Mechanismen wirken unabhängig von der gewählten Bahnbreite.

Eine kurze Werkzeugwechselzeit wird über den zentralen Befestigungsmechanismus realisiert, welcher einen schnellen Austausch des gesamten Verstellmechanismus inklusive des Kreismessers ermöglicht. Dieser gestattet auch eine externe Justierung des Kreismessers über den Verstellmechanismus.

5.1.4 Stapelstation

Die Stapelstation dient lediglich zur Validierung des flexiblen und kontinuierlich arbeitenden Handhabungssystems. Sie beschreibt einen Platzhalter für eine kontinuierliche Lösung zur Blattablage (z.B. ein Förderband), welche nicht Teil der Arbeit ist. Die nachstehenden Anforderungen werden infolgedessen allgemeingültig gehalten.

5.1.4.1 Anforderungen

In diesem Abschnitt sollen allgemeingültige Anforderungen auf Basis der abgeleiteten Prämissen definiert werden, vgl. Tabelle 5-4.

Tabelle 5-4: Relevante Prämissen zur Auslegung der Stapelstation

| Prämisse | |
|----------|--|
| P3-10 | Servo-pneumatische Achsen (Regelbarkeit / Anpressdruck) einsetzen |
| P3-22 | Materialübergabe möglichst kontrolliert gestalten (Ungenauigkeiten minimieren) |

Komponentendesign

Gemäß dem Stand der Technik ist eine **serielle Kopplung** eines **elektrischen und pneumatischen Aktors** sinnvoll, denn diese ermöglichen eine definierte Nachgiebigkeit in Z-Richtung. Benötigt wird der pneumatische Aktor zur Realisierung einer definierten und **wegunabhängig konstanten Fügekraft**, während der elektrische Aktor der **exakten Zustellung** der Stapelstation zum Handhabungssystem dient.

Prozessführung

Die Materialübergabe soll möglichst definiert erfolgen um **Ungenauigkeiten weitestgehend zu reduzieren**.

5.1.4.2 Umsetzung

Gemäß den Anforderungen kommt ein elektrischer Aktor mit pneumatischem Dämpfer zum Einsatz, vgl. Abbildung 5-12 links. Als **elektrischer Aktor** wird ein Hybrid-Linearaktuator mit Trapezgewindespindel (Nanotec L5918L3008-T10X2) verwendet. Dieser besitzt eine Schubkraft von 1000 N und eine Positionsauflösung von 10 µm pro Schritt um den Tisch anzuheben und präzise dem Handhabungssystem zustellen zu können⁹. Als pneumatischer Dämpfer wird ein Pneumatikzylinder (Festo ADN-32-5-P-A) mit 5 mm Hub und integrierter Sensornut verwendet, welcher über einen geringen Reibwert und gute Dämpfungseigenschaften verfügt¹⁰. Wie beschrieben wird der Hybrid-Linearaktuator im Aufbau zur Höhenverstellung der Stapelstation verwendet, vgl. Abbildung 5-12 rechts. Die Höhe kann dadurch, abhängig von der gewählten Elektrodenblattlänge, stets optimal an den Zustand des Handhabungssystems angepasst werden. Der **Pneumatikzylinder** ist kein Teil der Höhenverstellung und dient lediglich zur Einstellung der Fügekraft und dem Kollisionsschutz.

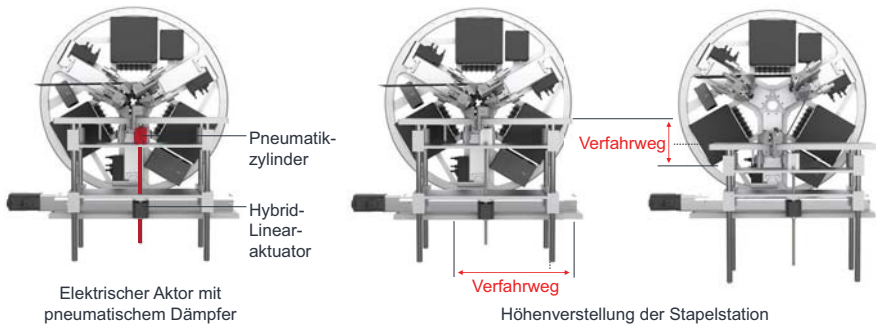


Abbildung 5-12: Darstellung der elektrisch-pneumatischen Lösung (links) sowie Stapelstation in der obersten (Mitte) und untersten (rechts) Position

Die Stapelstation kann darüber hinaus während der Blattablage horizontal verfahren werden. Dies dient der kontrollierten und kontinuierlichen Übergabe des Elektroden-einzelblattes an die Stapelstation. Die Fixierung des Einzelblattes auf der Stapelstation erfolgt in diesem Versuchsaufbau durch Unterdruck.

⁹ Nanotec: Linearaktuator – NEMA 23, https://de.nanotec.com/fileadmin/files/Baureiheneubersichten/Linearaktuatoren/Baureiheneubersicht_L59.pdf

¹⁰ Festo: Kompaktzylinder ADN/AEN, https://www.festo.com/cat/xdki/data/doc_de/PDF/DE/ADN_DE.PDF

5.2 Erarbeitung von Teillösungen

Nachfolgend werden die erarbeiteten **Teillösungen** zur Umsetzung eines **kontinuierlich arbeitenden, funktionsintegrierten** und **flexiblen Handhabungssystems** vorgestellt. Dies ermöglicht eine kontinuierliche und formatflexible Prozessführung für die Vereinzelung und Stapelbildung.



Abbildung 5-13: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 5 (Teil 2)

5.2.1 Kontinuierliches und funktionsintegriertes Handhabungssystem

Die grundsätzliche Aufgabe des Handhabungssystems besteht im kontinuierlichen Führen der Materialbahn sowie dem präzisen Zustellen (Fügen) der durch das Handhabungselement erzeugten Einzelblätter auf die Stapelstation.

5.2.1.1 Anforderungen

In diesem Abschnitt sollen die Anforderungen an das Handhabungssystem, die im Zusammenhang mit einer kontinuierlichen und funktionsintegrierten Prozessführung stehen, zusammengefasst werden.

Tabelle 5-5: Relevante Prämissen zur Umsetzung einer kontinuierlichen und funktionsintegrierten Prozessführung

| Prämisse | |
|----------|---|
| P1-01 | Bewegungsumkehr und hohe Dynamik im Prozess vermeiden |
| P1-02 | Zu- und Rückstellbewegungen vermeiden |
| P1-04 | Zuschnittgenauigkeit von Einflüssen durch Synchronisationsvorgänge entkoppeln |
| P1-05 | Gewicht aller bewegten Teile weitestmöglich reduzieren |
| P1-06 | Auf Magazine zum Zwischenspeichern von Elektroden verzichten |
| P1-10 | Konstanten Materialdurchsatz anstreben |
| P1-11 | Einzelprozessschritte durch Funktionsintegration reduzieren |
| P1-12 | Funktionsintegration grundsätzlich anstreben |
| P1-13 | Komplexitätsreduktion durch Funktions- und Prozessintegration erzielen |
| P1-14 | Nicht wertschöpfende und zeitaufwendige Funktionen eliminieren |

| | |
|-------|--|
| P1-15 | Keine unfixierten (losen) Zwischenprodukte im Prozess erzeugen |
| P1-20 | Stapelverfahren mit Einzelelektroden bevorzugen (mehr Freiheitsgrade) |
| P1-21 | Stapelverfahren ist Wickelverfahren vorzuziehen (bessere Zell-Performance) |
| P1-22 | Entkopplung von Elektrodengröße und Bearbeitungsgeschwindigkeit anstreben |
| P2-04 | Flexibilität und Verarbeitungsgeschwindigkeit dürfen nicht im Widerspruch stehen |
| P3-12 | Vermessung biegeschlaffer Bauteile im kontrollierten Zustand ermöglichen |
| P3-19 | Inhomogenitäten bei ausbildenden Druckfeldern vermeiden |
| P3-20 | Anzahl der Handhabungsvorgänge minimieren (Beschädigungsrisiko) |
| P3-21 | Homogenen Abstand zwischen Material und Wirkfläche beim Greifen sicherstellen |
| P3-22 | Materialübergabe möglichst kontrolliert gestalten (Ungenauigkeiten minimieren) |
| P3-24 | Greifen biegeschlaffer Bauteile in kontrollierbarem Zustand durchführen |
| P3-25 | Einfluss geometrischer Defekte durch optimale Materialführung reduzieren |

Prozessführung

Gemäß den Prämissen soll **von Zu- und Rückstellbewegungen** in der Prozessführung **abgesehen** werden, sodass eine weitestgehend kontinuierliche Verarbeitung möglich ist. **Bewegte Komponenten** sollen möglichst **gewichtsoptimiert** ausgeführt sein, um eine geringe Trägheit im System zu erhalten.

Die kontinuierliche Verarbeitung soll einen möglichst **konstanten Materialdurchsatz** ermöglichen, welcher **formatunabhängig** erzielt werden kann. Dies dient der Auflösung des bestehenden Zielkonfliktes zwischen Verarbeitungsgeschwindigkeit und Flexibilität, vgl. Kapitel 4. Die kontinuierliche Verarbeitung soll über eine **Funktionsintegration** umgesetzt werden, mit dem Ziel, diskontinuierliche und zeitintensive Einzelprozessschritte zu reduzieren. Ein weiteres Ziel der Funktionsintegration besteht in der Komplexitätsreduktion und Eliminierung nicht wertschöpfender Tätigkeiten.

Aufgrund der höheren Freiheitsgrade beim Verbundaufbau und der besseren Zellperformance soll ein **Stapel aus Einzelelektroden** hergestellt werden. Zur **Minimierung der Handhabungsvorgänge** in der Verbundherstellung soll der Prozess so gestaltet sein, dass **keine losen Zwischenprodukte** (Elektrodeneinzelblätter) im Prozess entstehen, die mehrfach gegriffen und wiederholt ausgerichtet (repetitive Vorgänge) werden müssen. Hinsichtlich der Handhabung ist auf eine Optimierung in Bezug auf die geometrischen Defekte von Elektroden und deren biegeschlaffes Verhalten zu achten. Die **Übergabe** von Material an den Greifer bzw. die Stapelstation soll **in einem Zu-stand** erfolgen, **in welchem das Material** über ein oder mehrere Prozessparameter (bspw. Bahnzugkraft) **kontrolliert werden kann**.

Qualitätskritische Vorgänge wie der Elektrodenzuschnitt sollen **von Synchronisationsvorgängen entkoppelt** werden, um eine bestmögliche Maßhaltigkeit der Ausgangsmaterialien (Elektroden) sicherzustellen, denn diese begrenzen die zu erzielende Stapelgenauigkeit nach unten, vgl. Kapitel 4. Gemäß den Prämissen soll **auf Magazine zum Zwischenspeichern von Elektroden verzichtet** werden. Dies begründet sich auch in der Zielstellung zur Reduzierung von Handhabungsvorgängen und der Vermeidung loser Zwischenprodukte.

Eine **Positionserfassung bzw. Vermessung** biegeschlaffer Materialien (Elektrodenbahn bzw. Elektrodenblatt) soll **in einem Zustand** erfolgen, in welchem der **Einfluss geometrischer Defekte kontrolliert** werden kann. Dieser Zustand soll auch dazu genutzt werden, um Inhomogenitäten zwischen dem Material und der Greifer-Wirkfläche zu vermeiden. In Kapitel 4.2.3 wurde am Beispiel eines Kathodenblattes gezeigt, dass es durch die geometrischen Defekte (Welligkeit) zu einer zeitlich versetzten Kontaktausprägung beim Greifvorgang kommen kann. Ziel des neuen Anlagenkonzeptes ist es daher, die geometrischen Defekte durch Prozessparameter zu beeinflussen, um Materialeinschlüsse in der Wirkfläche des Greifers zu vermeiden.

5.2.1.2 Umsetzung

Die Vorstellung der Umsetzung gliedert sich in fünf Teilbereiche, nämlich die Materialbereitstellung, die kontinuierliche Materialförderung (Führen), die Kontrollierbarkeit der Materialbahn, die Greif-Strategie, die prozessintegrierte Handhabung, die Vereinzelung (Formändern) und die Elektrodenblattübergabe (Fügen).

Materialbereitstellung

Im Rahmen der Untersuchungen von Götz (1991, S. 120) wurden verschiedene Bereitstellungsarten vorgestellt, nämlich:

- vereinzelt, nacheinander
- vereinzelt, gleichzeitig
- vorvereinzelt auf Trägerband
- ungeordnet, gleichzeitig
- gestapelt
- als Coil

Welche Bereitstellungsart für ein Verfahren ausgewählt wird, hängt im Wesentlichen von der **Vereinzelbarkeit des Materials** sowie den notwendigen **Überwachungsaufwänden** zur Kontrolle einer fehlerfreien Materialbereitstellung ab (Götz 1991, S. 123).

Die **Bereitstellung als Coil** ist laut Götz (1991, S. 123) immer dann besonders **vorteilhaft, wenn** der **Vereinzelungsaufwand vom Stapel hoch** ist und **unterschiedlich lange Abschnitte vom Coil abgelängt werden sollen**. Ein weiterer Vorteil in der Bereitstellung als Coil liegt in der Möglichkeit den Bahnzustand in Bezug auf geometrische Defekte – insbesondere in Bahnlaufrichtung – über die Bahnzugkraft zu beeinflussen. Diese Einflussnahme wirkt sich positiv auf die Handhabung und Vereinzelung aus.

Die initiale Materialbereitstellung im Rahmen des flexiblen Stapelverfahrens soll folglich „**als Coil**“ erfolgen, wobei sich diese nach dem Schneidvorgang zu „**vereinzelt, nacheinander**“ ändert.

Kontinuierliche Materialförderung

Gemäß den Anforderungen soll die Materialförderung kontinuierlich und ohne geschwindigkeitslimitierende Zu- und Rückstellbewegungen erfolgen. Besonders wichtig ist dabei ein konstanter Materialvorschub, um den bis dato bestehenden Kompromiss zwischen Flexibilität und Materialdurchsatz aufzulösen.

Umgesetzt wurde ein **kontinuierlich arbeitendes Verfahren**, vgl. Abbildung 5-14, welches das Material über eine Rotation (im Uhrzeigersinn) und Linearbewegung (vertikal) des Handhabungssystems fördert und zugleich der Stapelstation zustellt – auf den Bewegungsablauf wird in Kapitel 5.3 detaillierter eingegangen. Wie im Abschnitt „prozessintegrierte Vereinzelung“ erläutert, wird während der Rotation ein Einzelblatt erzeugt, wobei der Zustand der Elektrodenbahn bzw. des Elektrodenblattes allzeit definiert ist. Ungenauigkeiten durch unkontrollierte Materialübergaben werden auf ein Minimum reduziert, genauso wie die Fehlerrisiken durch zusätzliche Handhabungsvorgänge.

Abbildung 5-14 veranschaulicht den Verfahrensablauf der Kontaktherstellung, Materialförderung und Übergabe an die Stapelstation zu drei Zeitpunkten (ZP).

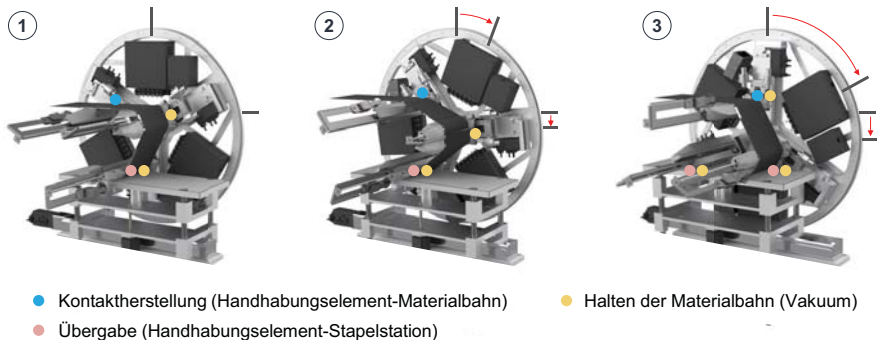


Abbildung 5-14: Bahnführung und Einzelblattablage im Anlagenmodul

ZP 1: Durch die Rotation des Handhabungssystems erfolgt eine linienförmige Kontaktherstellung zwischen Elektrodenbahn und Handhabungselement (blau) sowie zwischen Handhabungselement und Stapelstation (rot), während die Elektrodenbahn immer über mindestens zwei weitere Handhabungselemente gehalten wird (gelb).

ZP 2: Dieser Kontakt intensiviert sich mit der weiteren Drehung des oberen Handhabungselementes (blau) durch Umschlingung, bei simultaner Zustellung der Elektrodenbahn zur Stapelstation (rot).

ZP 3: Sobald das obere Handhabungselement hinreichend umschlungen ist (blau) wird das Vakuum aktiviert, sodass die Elektrodenbahn durch ein weiteres Handhabungselement gehalten wird (gelb) – gleichzeitig ist der Kontakt mit der Stapelstation vollständig hergestellt (rot) und die Stapelstation kann die Aufgabe des Haltens übernehmen.

Diese Art der Verfahrensführung bietet den Vorteil, dass keine losen Elektrodeneinzelblätter im Prozess erzeugt werden. Durch die fortwährende Kontrolle über das Material und die direkte Zustellung zur Stapelstation, entfällt auch die Notwendigkeit zur Speicherung und erneuten Ausrichtung der Elektrodeneinzelblätter. Toleranzen, Verschiebung und Verdrehung in der Flächenebene müssen nicht zusätzlich erfasst und korrigiert werden. Die Positionierung erfolgt rein über die Ausrichtung des Elektrodenbandes auf das Handhabungselement und die geometrische Bestimmtheit der Komponenten (Handhabungssystem-Stapelstation) zueinander.

Kontrollierbarkeit der Materialbahn

Bei der Aufnahme des Materials über den beschriebenen Mechanismus ergeben sich mehrere Vorteile gegenüber den etablierten Stapelbildungsverfahren. Diese bestehen im Wesentlichen in einer

- Zeitersparnis,
- Reduzierung von Faltenbildung und der
- Vermeidung von Lagefehlern.

Nachfolgend soll nur auf die letzten beiden Aspekte genauer eingegangen werden.

Hinsichtlich der Faltenbildung konnte Götz beim Aufnehmen von Folien beobachten, dass wenn ein Greifer nur mit einer Kante aufsetzt, sich das Bauteil beim Ansaugen ausgehend von dieser an den Greifer anrollt (sukzessives Ansaugen), womit eine Faltenbildung oder Lagenverschiebung weitaus weniger wahrscheinlich ist als beim Einsatz eines parallelen Greifers (1991, S. 86). Dieser Effekt kann weiterhin aktiv durch den Greifer unterstützt werden, indem dieser auf der ersten Hälfte des Bauteils aufsetzt und anschließend die zweite Hälfte über eine Rollbewegung aufnimmt (Götz 1991, S. 89).

Hinsichtlich der Lagefehler kommt es bei der Kontaktherstellung zwischen Elektrode und Greifer weniger wahrscheinlich zu einem Verschieben der Elektrodenposition, da der wirkende Bahnzug den Störkräften bei der Kontaktherstellung entgegenwirkt. Dies ist insbesondere bei großen Elektrodenformaten relevant, da hier bereits kleine Winkelfehler zu großen Abweichungen führen. Auch die in Kapitel 4 thematisierten etwigen Inhomogenitäten in Bezug auf die Druckfelder zwischen Material und Greifer spielen aufgrund der wirkenden Bahnzugkraft nur noch eine untergeordnete Rolle.

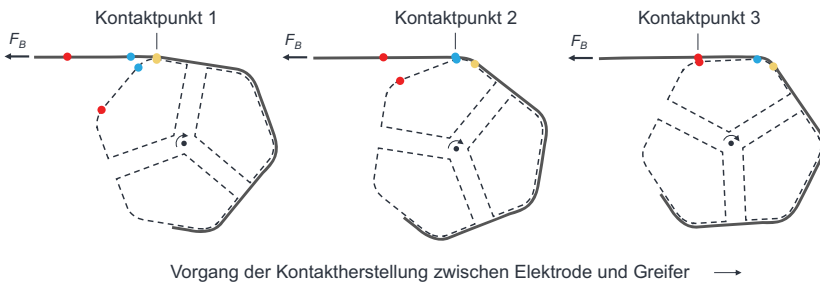


Abbildung 5-15: Punkt bzw. linienförmige Kontaktherstellung bei der Materialaufnahme

Abbildung 5-15 stellt den Vorgang der Kontaktherstellung zwischen Elektrodenbahn und Greifer (Handhabungselement) dar. Während die Elektrodenbahn über einen großen Umfang des Handhabungssystems gehalten wird, entsteht ein neuer, linienförmiger Kontakt zwischen Elektrode und Greifer durch dessen Rotation – visualisiert durch die farbigen Kontaktpunkte. Dieser entsteht durch sukzessives „Aufrollen“ des Materials und wirkt so der eingangs beschriebenen Faltenbildung entgegen. Darüber hinaus sorgt die über die Bahnbreite wirkende Zugkraft in Kombination mit der linienförmigen Kontaktherstellung für eine hohe spezifische Pressung und damit für ein gleichmäßiges Anschmiegen (keine Inhomogenitäten) der Elektrodenbahn am Flächengreifer.

In Bezug auf die Förderung der Elektrodenbahn bzw. der Elektrodeneinzelblätter liegt der Vorteil gegenüber dem Stand der Technik insbesondere darin begründet, dass der Materialzustand stets durch den wirkenden Bahnzug kontrolliert werden kann.

Greif-Strategie

Im Hinblick auf die Greiftechnik wurde in Kapitel 5.1.3 bereits dargestellt, dass sich der Einsatz vollflächiger Greifer vorteilhaft auf die Kontrollierbarkeit des Materials auswirkt. Aufgrund der Anforderungen an die Formatflexibilität gestaltet sich der Einsatz vollflächiger Greifer im zu entwickelnden Anlagenmodul jedoch schwierig.

Der vorgestellte Mechanismus zur Materialförderung erlaubt, aufgrund der wirkenden Bahnzugkraft, eine Kontrollierbarkeit der freien Bahnlänge zwischen den einzelnen Handhabungselementen. Dies verhindert ein Durchhängen der Materialbahn und somit auch potenzielle Abschälleffekte sowie die Notwendigkeit zur Unterdrucküberhöhung. Da sich die allgemeinen Nachteile des konventionellen teilflächigen Greifens durch den Mechanismus erübrigen, ist ein segmentiertes (teilflächiges) Greifen möglich.

Abbildung 5-16 veranschaulicht die beschriebenen Vorteile des Aufbaus. Der linke Teil der Abbildung zeigt die drei Handhabungselemente bzw. Greifer (grün) mit den jeweils dazwischenliegenden freien Bahnlängen. Die wirkende Bahnzugkraft F_B sorgt für ein Spannen der Elektrodenbahn zwischen den Elementen und wirkt Abschälleffekten entgegen. Dies ist insbesondere für den Zustand kurz vor der Elektrodenblattablage relevant, in welchem das Material entgegen der Schwerkraft gehalten werden muss.

Der rechte Teil der Abbildung zeigt Messungen zum Materialdurchhang in der freien Bahnlänge in Abhängigkeit der wirkenden Bahnzugkraft. Die Messungen wurden für

eine Anodenbahn der Breite von 65 mm und einer Elektrodenblattlänge von 260 mm durchgeführt. Der Abstand der Handhabungselemente zueinander respektive die freie Bahnlänge beziffern sich auf 125,206 mm. Das Flächengewicht der Elektrodenbahn betrug $0,267 \text{ kg/m}^2$. Der Durchhang wurde mithilfe des ATOS Triple Scan Systems der Fa. GOM ermittelt.

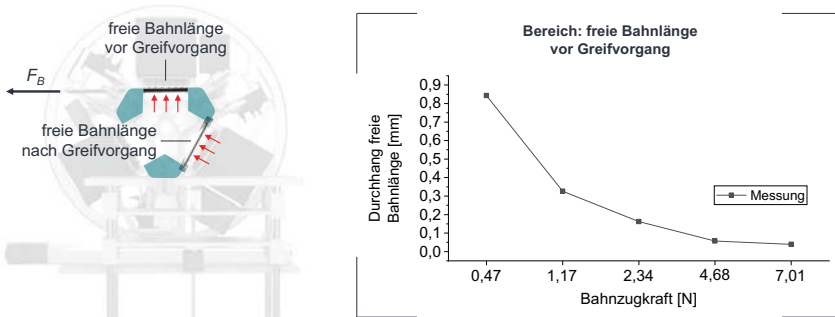


Abbildung 5-16: Zusammenhang zwischen dem Durchhang der Elektrodenbahn und der wirkenden Bahnzugkraft

Die Messungen in Abbildung 5-16 rechts zeigen, dass der Durchhang der Elektrodenbahn bereits für geringe Bahnzugkräfte vernachlässigbar ist. Die geringe Biegesteifigkeit des Materials und damit verbundene Abschleffeekte stellen somit keine prozesstechnischen Herausforderungen im vorgestellten Anwendungsfall dar.

Prozessintegrierte Handhabung, Vereinzelung und Elektrodenblattübergabe

Die prozessintegrierte Handhabung und Vereinzelung erfordert ein kontinuierliches Halten und punktgenaues Schneiden der Elektrodenbahn, während diese durch das Handhabungssystem gefördert wird. Das Halten erfolgt über einen Niederdruckflächen-sauger in Spezialform (Kap. 5.1.3.), das Scherschneiden durch den integrierten Schneidmechanismus aus Rund- und Langmesser. Damit dies prozesssicher funktioniert, müssen die einzelnen Vorgänge präzise aufeinander abgestimmt sein. Abbildung 5-17 veranschaulicht den Ablauf in Bezug auf das Aktivieren und Deaktivieren der einzelnen Vakuumkammern sowie das Auslösen des Schneidvorgangs.

In **Bezug auf die Handhabung** wurde in Kapitel 5.1.3 bereits der Aufbau der Handhabungselemente beschrieben. Jedes Handhabungselement besteht aus zwei Kammern, welche unabhängig voneinander angesteuert werden können. In Abbildung 5-17 ist der

allgemeine Verfahrensablauf zur Ansteuerung der Kammern dargestellt. Sobald die Elektrodenbahn durch Umschlingung eine weitere Vakuumkammer vollständig abdeckt, wird diese (1) aktiviert (ZP A zu B). Zeitgleich erfolgt die Deaktivierung der letzten aktivierten Kammer (4) um das Elektrodenblatt abzulegen und nicht wieder durch die Weiterdrehung des Handhabungssystems anzuheben. Während des Ablaufs sind immer mindestens zwei Vakuumkammern aktiv um die Elektrodenbahn zu halten.

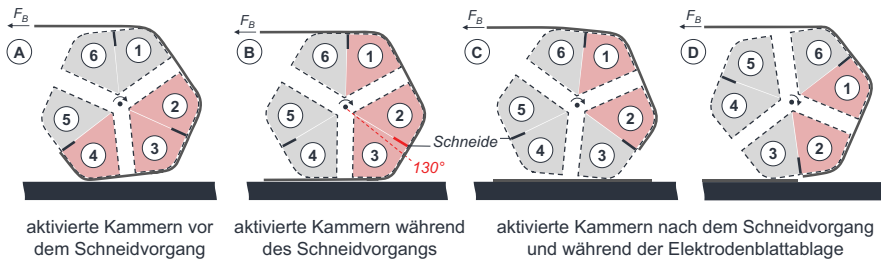


Abbildung 5-17: Ablauf des Handhabungs- und Schneidvorgangs in der kontinuierlichen Verfahrensführung

Der Schneidvorgang (in ZP B) erfolgt immer erst dann, wenn die wirkende Bahnzugkraft durch zwei Vakuumkammern (1) + (2) vor der Schneidlinie abgestützt wird (bei $\sim 130^\circ$). Das Material wird während des Schneidvorgangs immer beidseitig durch zwei aktivierte Vakuumkammern (2) + (3) fixiert. Dies stabilisiert zusammen mit dem Niederhalter des Schneidmechanismus den Schneidvorgang und begünstigt eine hohe Schnittqualität.

Die **Elektrodenblattübergabe** (in ZP C und D) vom Handhabungssystem an die Stapelstation kann im zugrundeliegenden Aufbau prinzipiell auf zwei Arten erfolgen – durch Ablegen des Bauteils in die Richtung der Flächennormalen oder durch Abrollen auf dem Stapeltisch. Da das Anlagenmodul kontinuierlich arbeiten soll, sind Verweilzeiten durch die Elektrodenblattablage auf der Stapelstation nicht zulässig, womit nur eine Abrollbewegung in Betracht kommt – siehe Verfahrensablauf in Abbildung 5-17.

Ein weiterer Vorteil dieser Übergabestrategie liegt in der Vermeidung von Lufteinschlüssen zwischen dem Elektrodenblatt und Stapeltisch, vgl. Abbildung 5-18. Der quasi umgekehrte Effekt wurde von Götz (1991, S. 118) für das Abstapeln beschrieben. Dort kam es zu einem Unterdruck zwischen den Schichten beim Abheben in Richtung der Flächennormalen. Analog kommt es beim Ablegen eines Elektrodenblattes zu einem

Überdruck zwischen Elektrodenblatt und Stapeltisch. Da der Vorgang synchron und in verhältnismäßig kurzer Zeit erfolgt, kann die eingeschlossene Luft nur seitlich entweichen und der entstehende Staudruck führt ggf. zu einem Materialeinschluss nach Kontakttherstellung zwischen Elektrode und Stapeltisch. Beim Ablegen durch eine Abrollbewegung hingegen kann die Luft seitlich entweichen und es kommt weniger wahrscheinlich zu einem Luft- und folglich Materialeinschluss zwischen Greifer und Stapeltisch.

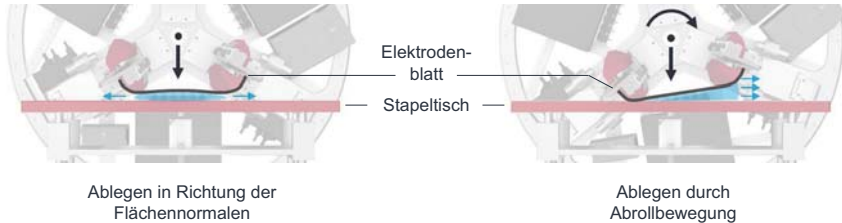


Abbildung 5-18: Elektrodenblattübergabe durch Ablegen (links) und Abrollen (rechts) auf den Stapeltisch

5.2.2 Flexibles Handhabungssystem

Die grundsätzliche Aufgabe des Handhabungssystems besteht darin, Elektrodenblätter unterschiedlicher Längen und Breiten zu vereinzeln und diese präzise an die Stapelstation zu übergeben.

5.2.2.1 Anforderungen

In diesem Abschnitt sollen die Anforderungen an das Handhabungssystem, welche in Zusammenhang mit einer flexiblen Prozessführung stehen, formuliert werden.

Tabelle 5-6: Relevante Prämissen zur Umsetzung einer flexiblen Prozessführung

Prämisse

| | |
|-------|---|
| P1-08 | Formatunabhängige Ausrichtung (Elektrode) ohne Anpassung/Rüsten anstreben |
| P2-01 | Bearbeitungsspektrum ohne Komponententausch und Rüstvorgänge realisieren |
| P2-02 | Elektrodenblattlänge von Restriktionen des mech. Aufbaus (z.B. Bauräume) entkoppeln |
| P2-03 | Formatgebundene Anfertigungsteile (Greifer, Grundplatten, etc.) vermeiden |
| P2-05 | Definiertes Greifen bei gleichzeitig hoher Flexibilität (Elektrodengröße) ermöglichen |
| P2-07 | Schneidposition, zur Kompensation von Über-/Untermaß, im μm -Bereich einstellbar gestalten |
| P2-10 | Optimale Führung und Ausrichtung von Materialbahnen variabler Breite ermöglichen |
| P2-12 | Herstellbare Einzelblattgröße von Materialeigenschaften (Biegesteifigkeit) entkoppeln |
| P2-14 | Großes Bearbeitungsspektrum für unterschiedliche Zellformate abdecken |
| P2-15 | Elektrodenweite soll besonders flexibel anpassbar sein |

| | |
|-------|--|
| P3-05 | Komponenten hoher Präzision verwenden (Genauigkeit Zuschnitt, Positionierung) |
| P3-17 | Prozessqualität beim Greifen von Materialeigenschaften (Biegesteifigkeit) entkoppeln |
| P3-23 | Vollflächiges Greifen bevorzugen (Kontrollierbarkeit Materialposition) |

Komponentendesign

Gemäß den Analysen in Kapitel 4 muss ein großes **Bearbeitungsspektrum** abgedeckt werden. Dies soll **ohne die Notwendigkeit** anlagenseitiger **Anpassungen und Rüstvorgänge** realisiert werden, um eine reelle Flexibilität zu gewährleisten. Dazu ist eine **Entkopplung des Elektrodenformates von Restriktionen des mechanischen Aufbaus** (z.B. Bauraum, Achslänge etc.) notwendig. Dazu ist der **Verzicht auf formatspezifische Anfertigungsteile** erforderlich.

Komponentenauswahl

Für die qualitätskritischen Vorgänge (z.B. Ausrichtung) sollen **Komponenten** mit möglichst hoher Genauigkeit verwendet werden. Diese sollen unabhängig von der zu verarbeitenden Bahnbreite und Elektrodenblattgröße eingesetzt werden können.

Prozessführung

Eine hohe Flexibilität und Prozessqualität sind auch für den Greifvorgang notwendig, weshalb **material- und flexibilitätsseitige Einflüsse durch eine optimale Prozessführung reduziert** werden sollen.

Anlagenparameter

Zu Gewährleistung einer präzisen Zuschnittgenauigkeit soll die **Schneidposition** zur Kompensation von Über/Untermaß **im µm-Bereich einstellbar** sein.

5.2.2.2 Umsetzung

Im Folgenden wird auf den Verstellmechanismus, welcher eine stufenlose Veränderung der Elektrodenblattlänge erlaubt, sowie auf die bauteil- und bauraumbedingten Restriktionen des Aufbaus eingegangen.

Verstellmechanismus

Die Handhabungselemente sind über jeweils eine Linearachse (Oriental Motor EZS4-E015-AZMCD-3) mit hoher Steifigkeit an die kreisförmige Grundplatte angebunden und können präzise in radialer Richtung positioniert werden, vgl. Abbildung 5-19.

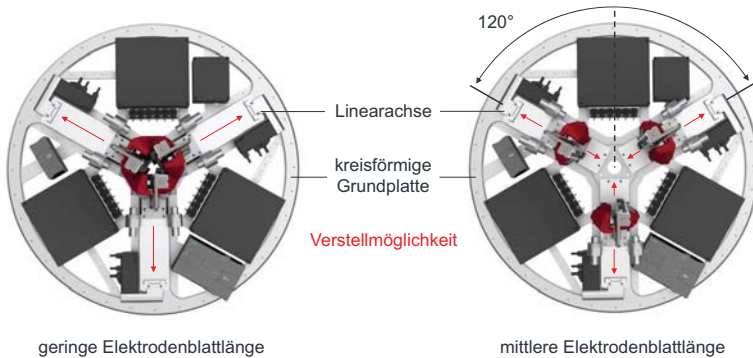


Abbildung 5-19: Verstellung der Handhabungselementposition zur Erzeugung unterschiedlicher Elektrodenblattlängen

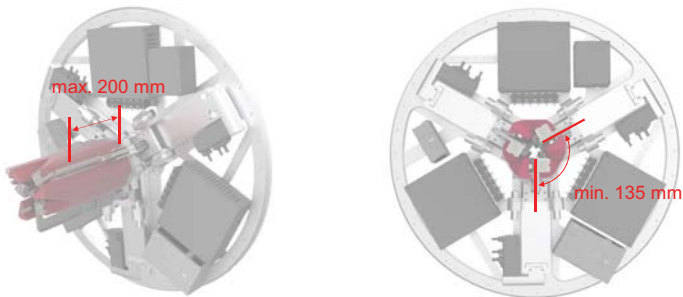
Der Verfahrweg der ausgewählten Achsen beträgt 150 mm, die Wiederholpositioniergenauigkeit $\pm 20 \mu\text{m}$. Die Position wird über einen integrierten Absolutwertgeber und Controller erfasst und eingeregelt. Zusätzlich ist die Linearachse mit einer elektromagnetischen Bremse ausgerüstet und kann so ein Haltemoment von bis zu 140 N aufbringen¹¹. Dies deckt den eingangs beschriebenen Bahnzugkraftbereich vollständig ab.

Der Verstellmechanismus kann darüber hinaus auch zum Ausgleich materialbedingter Längenabweichungen, vgl. Kapitel 4.2, genutzt werden.

Bauteil- und bauraumbedingte Restriktionen

Obwohl das Anlagenmodul ohne formatgebundene Anfertigungsteile, Komponententausch und mechanische Rüstvorgänge auskommt, gibt es bauraum- und bauteilbedingte Restriktionen hinsichtlich der herzustellenden Elektrodenblattgrößen, vgl. Abbildung 5-20.

¹¹ Orientalmotor: Linearaktuator mit integriertem Controller – EZS-AZ, https://www.orientalmotor.ch/Products/Linear_rotary_actuators/Electric_linear_slides/High_rigidity/Ezs_az_flex/?&feld037=200+N&up=filter1



Begrenzung der Elektrodenblattbreite

Begrenzung der Elektrodenblattlänge

Abbildung 5-20: Bauteil- und bauraumbedingte Restriktionen des Anlagenmoduls

Die **Elektrodenblattbreite** ist nach unten weniger durch den Aufbau selbst als durch das Anforderungsspektrum begrenzt. Elektrodenblattbreiten unterhalb von 25 mm sind im recherchierten Spektrum und nach der Einschätzung von Bach (2017, S. 47) nicht marktrelevant. Nach oben ist die Elektrodenblattbreite durch die Dimensionierung des Handhabungselementes begrenzt, welche im Umsetzungsbeispiel bei 200 mm liegt, vgl. Abbildung 5-20. Durch eine Vergrößerung der Handhabungselemente könnte das Bearbeitungsspektrum jedoch problemlos erweitert werden.

Die **Elektrodenblattlänge** ist nach unten durch den Bauraum beschränkt den die Handhabungselemente in deren innersten Position einnehmen. In der gegenwärtigen Ausführung beträgt die Mindestelektrodenblattlänge 135 mm, wobei auch dieser Wert keine allgemeine Restriktion des Verfahrens darstellt. Nach oben ist die Elektrodenblattlänge nicht begrenzt, da durch das steuerungsseitige „nicht Auslösen“ des Schneidmechanismus auch immer ein Vielfaches der eingestellten Elektrodenblattlänge gefördert und abgelegt werden kann.

5.3 Erarbeitung der Gesamtlösung

In diesem Kapitel wird die erarbeitete **Gesamtlösung** in Form des entwickelten **Coil2Stack-Moduls** vorgestellt. Dieses **integriert alle vorgestellten Einzel- und Teillösungen** in einem Anlagenmodul und ermöglicht die formatflexible und kontinuierliche Vereinzelung und Positionierung von Elektrodeneinzelblättern auf dem Stapeltisch.

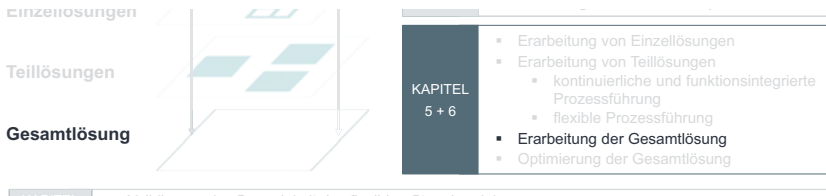


Abbildung 5-21: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 5 (Teil 3)

5.3.1 Gesamtaufbau (Coil2Stack-Modul)

Im folgenden Unterkapitel werden Anforderungen an den Gesamtaufbau vorgestellt, gefolgt von der Erläuterung der konkreten Umsetzung.

5.3.1.1 Anforderungen

Die Prämissen zur Auslegung des Gesamtaufbaus sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 5-7: Relevante Prämissen zur Auslegung des Gesamtaufbaus

| Prämisse | |
|----------|--|
| P2-09 | Eignung für unterschiedliche Materialsysteme und Bearbeitungszustände |
| P2-13 | Flexibilität in beiden Prozessschritten (Vereinzeln und Stapeln) adressieren |

Prozessführung

Das Anlagenkonzept soll für Elektroden unterschiedlicher Bearbeitungszustände (z.B. Bahnbreiten, Beschichtungsmuster etc.) und Materialsysteme (z.B. Binderanteil etc.) geeignet sein.

Anlagendesign

Das Anlagenkonzept soll hohe Flexibilität in den Prozessschritten Vereinzeln und Stapeln ermöglichen, um die Problemstellung gesamtheitlich zu adressieren.

5.3.1.2 Umsetzung

Abbildung 5-22 veranschaulicht den Gesamtaufbau des Anlagenmoduls. Dieses kann Materialbahnen von bis zu 200 mm Breite (exklusive Ableiter) verarbeiten, wobei die Beschichtungskante stets in einem Abstand von 100 mm zur Grundplatte geführt wird.

Die Materialbahn kann mit einem durchgängigen oder ausgeformten Ableiterföhnchen verarbeitet werden.

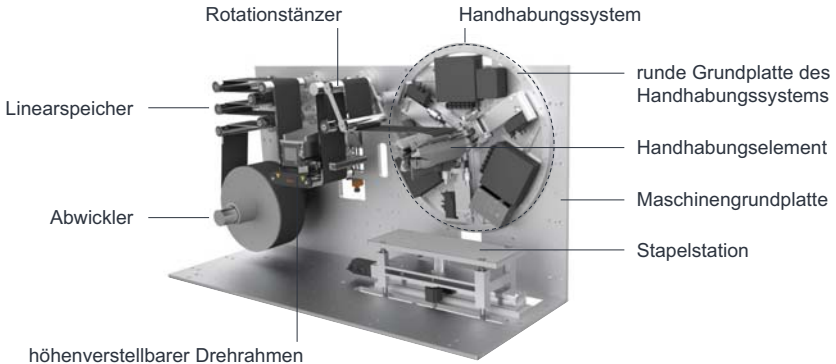


Abbildung 5-22: Gesamtaufbau (Coil2Stack) zur kontinuierlichen und formatflexiblen Vereinzeln und Stapelbildung

Aufgrund des Mindestbiegeradius von 25 mm, erlaubt der Aufbau auch die Verarbeitung von Materialien, welche sensibel auf Biegebelastung reagieren – bspw. dickschichtige Elektroden mit geringen Binderanteilen. Zur Schonung der Materialien wurde die Anzahl an Umlenkwalzen zudem auf ein Minimum reduziert.

Gemäß den Anforderungen erfolgte eine Integration der Prozessschritte Vereinzeln und Stapeln, um ein ganzheitliches Konzept umzusetzen. Der Aufbau selbst beinhaltet keinerlei formatgebundene Komponenten und der Rüstvorgang erfolgt rein steuerungsbauiert, ohne die Notwendigkeit händischer Tätigkeiten am Aufbau.

5.3.2 Verfahrensablauf

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an den Verfahrensablauf sowie die Umsetzung im Anlagenmodul vorgestellt.

5.3.2.1 Anforderungen

Die nachstehende Tabelle 5-8 fasst die zur Formulierung der Anforderungen relevanten Prämissen an den Verfahrensablauf zusammen.

Tabelle 5-8: Relevante Prämissen zur Gestaltung des Verfahrensablaufs

| Prämisse | |
|----------|--|
| P1-03 | Kontinuierliche Verfahrensführung für alle Materialien anstreben |
| P1-16 | Harmonisierung der Geschwindigkeit für die Vereinzelung und Stapelbildung |
| P1-17 | Repetitive Vorgänge (z.B. Ausrichtung) vermeiden |
| P1-18 | Einmal hergestellte Genauigkeiten beibehalten |
| P1-19 | Funktionen zum Messen, Prüfen und Orientieren in den Prozessablauf integrieren |
| P3-27 | Bearbeitungsreihenfolge „Längsschneiden - Notching – Ablängen“ präferieren |

Prozessführung

Entsprechend den Prämissen, soll eine kontinuierliche Verfahrensführung und **Harmonisierung der Verarbeitungsgeschwindigkeit** für die Vereinzelung und Stapelbildung erfolgen. Dies dient der Vorbeugung von Ineffizienzen durch abweichende Verarbeitungsgeschwindigkeiten bei Formatänderung. **Repetitive Vorgänge** sollen **vermieden** und einmal hergestellte **Genauigkeiten erhalten** werden. **Zeitaufwendige Funktionen** wie das Messen, Prüfen und Orientieren sollen **in den Prozessablauf integriert** werden. Die in der Industrie **übliche Bearbeitungsreihenfolge** „Längsschneiden – Notching – Ablängen“ soll aufgrund der besseren Kontrollierbarkeit des Bahnzustandes **eingehalten** werden.

5.3.2.2 Umsetzung

Kontinuierliche Verfahrensführung

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, integriert das Anlagenmodul die Prozesse Vereinzeln (Ablängen) und Stapeln, sodass deren Verarbeitungsgeschwindigkeit zwangsläufig identisch ist. Aufgrund dessen, dass die Verfahrensgeschwindigkeit der Stapelstation die Umfangsgeschwindigkeit des Handhabungssystems bestimmt und diese wiederum unabhängig von der Elektrodenblattlänge vorgegeben werden kann, ist der Output des Anlagenmoduls nicht mehr abhängig von der Elektrodenblattlänge und dem Anlagentakt. Das Einstellen der **Verarbeitungsgeschwindigkeit** erfolgt **unabhängig von der Elektrodenblattlänge**, wodurch der Materialdurchsatz in Bahnaufrichtung stets konstant gehalten werden kann. Auf die Zusammenhänge im Bewegungsablauf zur Erzeugung des konstanten Materialvorschubs soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

Die drei Handhabungselemente bilden zusammen eine unrunde geometrische Form. Abhängig von der herzustellenden Elektrodenblattlänge ändern sich die Längenverhältnisse im Aufbau, vgl. Kapitel 5.2.2.

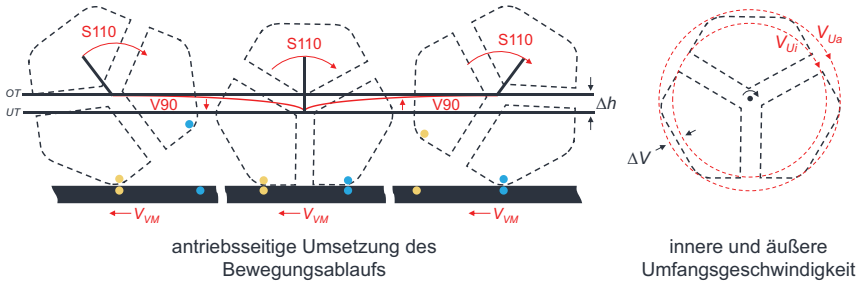


Abbildung 5-23: Antriebsseitige Umsetzung der Ablagebewegung (links) und geometriebedingte Umfangsgeschwindigkeitsdifferenz (rechts)

Wie beschrieben, befinden sich die **Stapelstation und Handhabungselemente in Synchronisation**, dargestellt über die Farbmarkierungen, wobei ein linienförmiger Kontakt bei der Übergabe realisiert wird. Um diesen komplexen Bewegungsablauf abzubilden, ist ein präzises Zusammenwirken aller Antriebe notwendig. Am Bewegungsablauf beteiligt sind insgesamt drei Antriebe: ein Antrieb zur Bewegung der Stapelstation sowie zwei Antriebe zur Bewegung des Handhabungssystems. Die Stapelstation gibt die Geschwindigkeit V_{VM} in horizontale Richtung vor und fungiert als Master. Die drei Handhabungselemente sollen der gleichförmigen Bewegung des Masters (der Stapelstation) folgen, wobei die unrunde geometrische Form einen Ausgleich der Höhendifferenz Δh und Umfangsgeschwindigkeitsdifferenz ΔV erfordert, vgl. Abbildung 5-23.

Der Höhenausgleich erfolgt antriebsseitig über einen Siemens V90 Servo-Antrieb, wobei das gesamte Handhabungssystem vertikal verfährt. Dieses ist über zwei Linearführungen hoher Steifigkeitsklasse und einen Kugelgewindetrieb an die Grundplatte angebunden. Die Höhendifferenz Δh ist abhängig von der Elektrodenblattlänge respektive der Position der Handhabungselemente im Handhabungssystem.

Der **Antrieb des Handhabungssystems** sowie der **Ausgleich der Geschwindigkeitsdifferenz** erfolgt über einen Siemens S110 Servo-Antrieb. Dieser versetzt das Handhabungselement in eine Drehbewegung, wobei die Geschwindigkeit stets so geregelt wird, dass die Umfangsgeschwindigkeit konstant bleibt.

Abbildung 5-24 zeigt die Position des Virtual Masters (VM) sowie die Geschwindigkeiten und Positionen der Antriebe, welche zur Steuerung des Bewegungsablaufs notwendig sind.

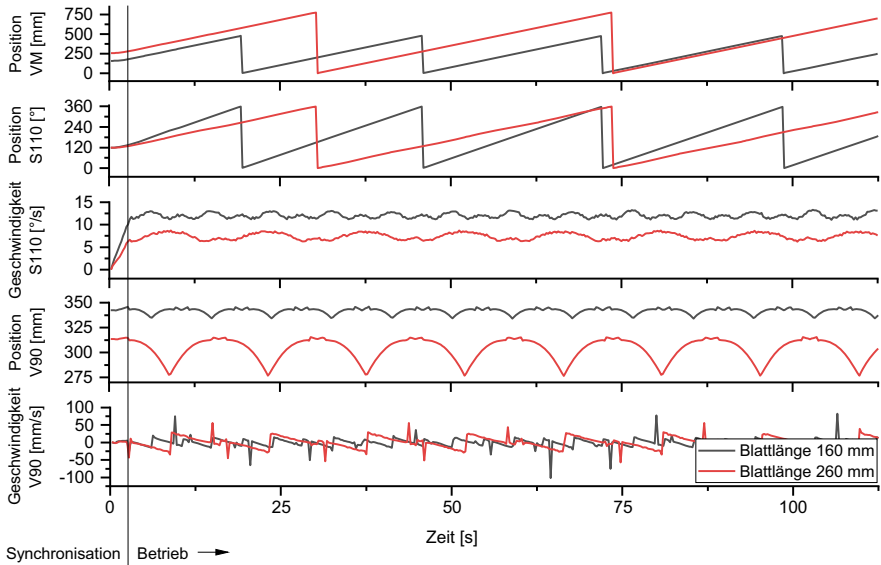


Abbildung 5-24: Positions- und Geschwindigkeitsdaten der Antriebe bei 16 mm/s Bahnvorschub für zwei Blattlängen (in Anlehnung an (A_Schmidgruber 2020))

Zu Beginn der Aufzeichnung findet ein Synchronisationsvorgang statt, nach welchem sich alle Achsen in einem gleichförmigen Bewegungsablauf befinden. Die Synchronisation erfolgt über eine Kurvenscheibenberechnung, welche zu Beginn jeder herzustellenden Elektrodenblattlänge neu berechnet wird (A_Schmidgruber 2020). Nachfolgend soll auf die einzelnen Teildiagramme eingegangen werden.

Position VM: Das oberste Diagramm zeigt die Position des Virtual Masters, welche der Position der Stapelstation in horizontaler Richtung entspricht. Wie zuvor beschrieben bewegt sich diese unter dem Handhabungselement hindurch, um eine punktförmige Übergabe unter der Drehbewegung des Handhabungssystems zu ermöglichen. Der Verfahrensweg der Stapelstation ist formatabhängig und nimmt mit der Elektrodenblattlänge zu, da die Dauer der Übergabe aufgrund der größeren Blattlänge steigt. Der sägezahnförmige Verlauf ergibt sich aus der Rückstellbewegung der Stapelstation und entfällt bei einer kontinuierlichen Lösung (z.B. mittels Förderband).

Position S110: Die Position des S110 repräsentiert die Drehbewegung des Handhabungssystems. Aufgrund des konstanten Bahnvorschubs von 16 mm/s ist diese für geringere Elektrodenblattlängen schneller als für größere Blattlängen. Die Drehbewegung ist annähernd linear und nur durch die Beschleunigung und Verzögerung des Handhabungssystems leicht schwankend. Der Sägezahnverlauf ergibt sich lediglich durch die Auftragung in Grad und dem damit verbundenen Sprung von 360° auf 0°.

Geschwindigkeit S110: Die Geschwindigkeit des S110 ist abhängig von der Elektrodenblattlänge. Dies liegt daran, dass die Handhabungselemente für größere Elektrodenblattlängen weiter radial vom Drehpunkt entfernt positioniert sind und so eine identische Umfangsgeschwindigkeit bei geringerer Drehzahl erreichen. Die Geschwindigkeitsschwankungen resultieren aus der Vorgabe der Fördergeschwindigkeit durch den Virtual Master und die unrunde geometrische Form der Mantelfläche um die drei Handhabungselemente. Über diese Regelstrategie werden zugleich auch Bahnzugkraftschwankungen im System weitestgehend ausgeglichen.

Position V90: Die Position des V90 repräsentiert die vertikale Position des Handhabungssystems zur Kompensation der unrunder Geometrie der drei Handhabungselemente beim Abrollen auf der Stapelstation. Der Höhenausgleich ist formatabhängig und nimmt mit steigender Elektrodenblattlänge zu. Für die in Abbildung 5-23 exemplarisch gewählten Längen beziffert sich die Ausgleichsbewegung auf 9,3 mm (Blattlänge = 160 mm) und 35,3 mm (Blattlänge = 260 mm).

Geschwindigkeit V90: Der Geschwindigkeitsverlauf des V90 zeigt Schwankungen, welche in der Bewegungsumkehr beim Erreichen des oberen und unteren Totpunkts (OT und UT) begründet sind. Aufgrund der geringen Abtastrate von 4 Hz bei der Aufzeichnung der Datenpunkte, fallen die Werte zudem unterschiedlich hoch aus.

Funktionsintegration und Bearbeitungsreihenfolge

Die in den Einzel- und Teillösungen beschriebenen Maßnahmen zur Funktionsintegration erlauben das **Eliminieren repetitiver Vorgänge**. Dies führt zu einem **Wegfall** zahlreicher **diskontinuierlicher Vorgänge**, bspw. dem Stapeln und der Entnahme von Elektrodeneinzelblättern in und aus den Magazinen, sowie einer Reduktion der Anzahl **qualitätskritischer Vorgänge**, bspw. eine mehrfache Messung und Ausrichtung.

Das Anlagenmodul übernimmt die Aufgabe der Ausrichtung des Elektrodenbandes, dessen Konfektionierung zu Einzelblattelektroden sowie deren präzise Ablage auf der Stapelstation. Abbildung 5-25 veranschaulicht den Funktionsplan des entwickelten Anlagenmoduls, welcher im Vergleich zu den Funktionsplänen zur Vereinzelung und Stapelbildung aus Kapitel 4 deutlich verkürzt ist.

Funktionsplan – Coil2Stack

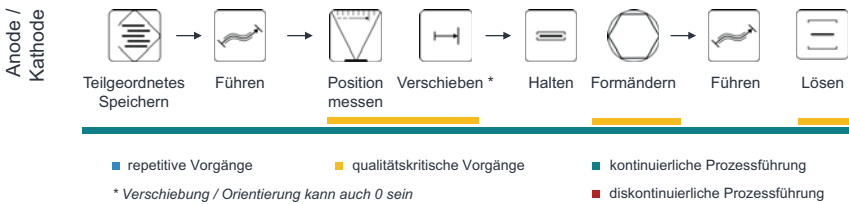


Abbildung 5-25: Funktionsplan des Coil2Stack Anlagenmoduls (Symbolik: VDI 1990)

5.4 Realisierung

Abbildung 5-26 zeigt die Realisierung des Anlagenmoduls mit Beschriftung aller zentralen Komponenten.



Abbildung 5-26: Realisierung des Anlagenmoduls zur formatflexiblen Stapelbildung (Bedienerseite)

Zum Personenschutz, insbesondere aufgrund der Schneideinheit, wurde das Modul vollständig mit Polymethylmethacrylatglas (Acrylglas) umhaust. Für Wartungsarbeiten und zur Materialbestückung wurden zwei großzügige und abschließbare Türen angebracht. Die Leistungselektronik befindet sich zu großen Teilen im unteren Teil der Anlage und ist in zwei Schaltschränken mit Sichtfenster untergebracht.

Abbildung 5-27 zeigt die Rückseite des Aufbaus. Gut zu erkennen ist die Befestigung der Komponenten auf einer zentralen Grundplatte, welche insgesamt für eine hohe Genauigkeit der Anlage sorgt. Die Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten an der Anlagenrückseite (Antriebsseite) wurde ebenfalls durch zwei abschließbare Türen umgesetzt.

Links in der Abbildung zu erkennen ist der Servo-Antrieb (Siemens S110) zur Umsetzung der Drehbewegung des Handhabungssystems sowie der Schleifring und Druckluftdrehverteiler, über welche die Medienversorgung des Handhabungssystems erfolgt. In der Mitte befindet sich der Servo-Antrieb (Siemens V90) zur Realisierung der vertikalen Bewegung des Handhabungssystems. Ebenfalls ersichtlich ist der Rundschwenkzylinder zum Antrieb des Rotationstänzers und das Potentiometer. Im rechten Teil der Abbildung zu sehen ist die Höhenverstellung des Drehrahmens, der Linearzylinder zum Antrieb des Speichers sowie der Antrieb für den Abwickler.



Abbildung 5-27: Realisierung des Anlagenmoduls zur formatflexiblen Stapelbildung (Antriebsseite)

6 Optimierung der Anlagenparameter

Das Ziel dieses Kapitels ist es, optimale Parameter für das entwickelte Anlagenmodul zu finden, sodass im nachfolgenden Validierungskapitel eine hohe Elektrodenmaßgenauigkeit und Positioniergenauigkeit erzielt werden kann. Die Parameter werden über die Untersuchung von Wechselwirkungen im reellen Aufbau hergeleitet.

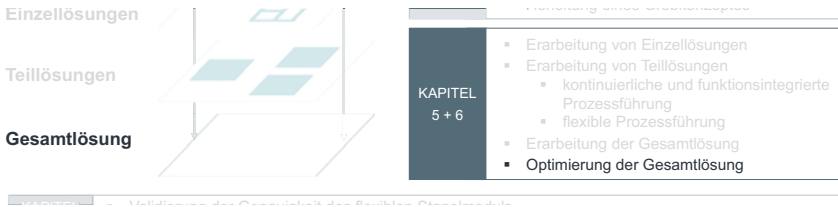


Abbildung 6-1: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 6

6.1 Identifikation qualitätskritischer Einflüsse

Das in Kapitel 5 beschriebene Handhabungssystem ist maßgeblich für die Maßhaltigkeit des Elektrodenblattzuschchnittes sowie die Positioniergenauigkeit der Einzelelektrodenblätter verantwortlich. Nachfolgend sollen deshalb qualitätskritische Wechselwirkungen innerhalb des Handhabungssystems erörtert werden. Da die Bahnzugkraft den wichtigsten Parameter darstellt und einen maßgeblichen Einfluss auf die Elektrodenblattmaßhaltigkeit hat, beschränken sich die folgenden Untersuchungen auf diesen elementaren Parameter.

Abbildung 6-2 zeigt das Handhabungssystem zum Zeitpunkt der Kontaktherstellung zwischen Materialbahn und Handhabungselement (H2). Dieser bestimmt maßgeblich den Zustand, in welchem die Materialbahn an das Handhabungssystem übergeben wird und somit die Maßhaltigkeit des entstehenden Einzelblattes.

Zur Identifikation optimaler Prozessparameter sollen folgende Aspekte in Abhängigkeit unterschiedlicher Bahnzugkräfte untersucht werden:

- Elastische Dehnung der Materialbahn
- Materialdurchhang in der freien Bahnlänge
- Nachgiebigkeit der runden Grundplatte
- Nachgiebigkeit des Gesamtaufbaus

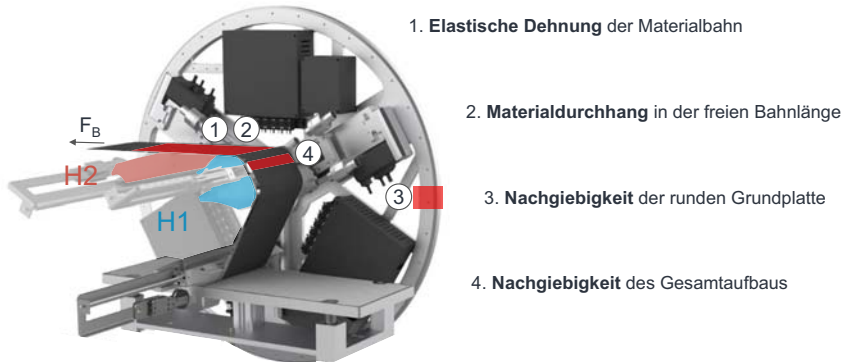


Abbildung 6-2: Untersuchungen zur Identifikation optimaler Prozessparameter

6.2 Untersuchung der Wechselwirkungen im Aufbau

Bei der Untersuchung gilt es zu beachten, dass die Bahnzugkraft innerhalb des Systems aufgrund von Reibungsverlusten nicht homogen ist. Aus diesem Grund wurde das Verhältnis zwischen eingestellter und tatsächlich wirkender Bahnzugkraft im Bereich der freien Bahnlänge in einer weiteren Messreihe ermittelt. Die nachstehende Tabelle 6-1 fasst die Zusammenhänge für verschiedene Bahnzugkräfte zusammen.

Tabelle 6-1: Verhältnis zwischen eingestellter und tatsächlich wirkender Bahnzugkraft

| Eingestellte Bahnzugkraft [N] | Tatsächlich wirkende Bahnzugkraft in der freien Bahnlänge [N] | Verhältnis |
|-------------------------------|---|------------|
| 0,5 | 0,47 | |
| 1,25 | 1,17 | |
| 2,5 | 2,34 | 1 : 1,07 |
| 5 | 4,68 | |
| 7,5 | 7,01 | |

Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen und für die abgeleiteten Prozesskennfelder wird der Lesbarkeit halber stets die eingestellte Bahnzugkraft angegeben.

Die nachfolgenden Untersuchungen beziehen sich allesamt auf eine beidseitig beschichtete Anodenbahn mit 65 mm Breite (ohne Ableiterföhnchen). Die Kollektorfolienstärke beträgt 10 μm und die Aktivmaterial-Trockenschichtstärke etwa 70 μm pro Seite.

6.2.1 Elastische Dehnung der Materialbahn

Einen untergeordneten aber dennoch messbaren Effekt in Bezug auf die Maßhaltigkeit des Elektrodenzuschchnittes stellt die Dehnung der Elektrodenbahn unter der wirkenden Bahnzugkraft dar. Um die Dehnung zu quantifizieren wurden Anodenbahnen sowie reine Kupferfolien im Zugversuch getestet, vgl. Abbildung 6-3.

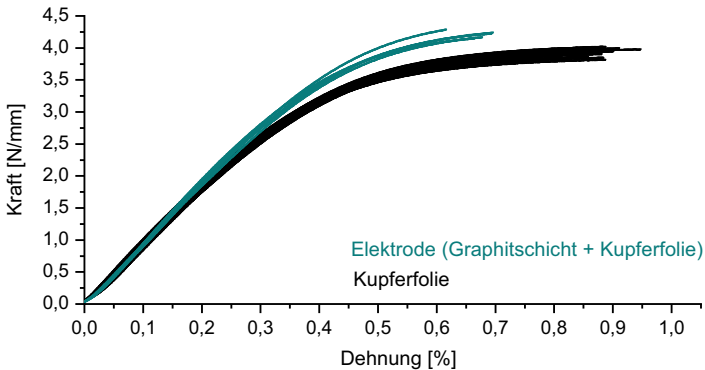


Abbildung 6-3: Kraft-Dehnungs-Diagramm für Elektroden (Anode) und Kupferfolien (Folie N = 15, Folie + Beschichtung N = 6)

Die grünen Kurven veranschaulichen den Verlauf der beidseitig mit Graphit beschichteten Kupferfolien (Anodenbahn), die schwarzen Kurven den Verlauf der reinen Kupferfolien. Für kleine Kräfte entsprechen sich die Verläufe annähernd, folglich kann die elastische Dehnung auch über das Testen des Stromkollektors (hier Kupferfolie) approximiert werden. Die nachfolgende Tabelle fasst die Messergebnisse zusammen.

Tabelle 6-2: Einfluss der elastischen Dehnung auf die Elektrodenblattmaßhaltigkeit

| Bahnzugkraft [N] | el. Dehnung bei 25 mm Probenbreite [%] | el. Dehnung bei 65 mm Bahnbreite [%] | Längendifferenz bei 260 mm Blattlänge [mm] |
|------------------|--|--------------------------------------|--|
| 0,5 | * | * | * |
| 1,25 | 0,000082718 | * | * |
| 2,5 | 0,006527041 | 0,000301 | -0,0007862 |
| 5 | 0,0165872 | 0,006678 | -0,0173628 |
| 7,5 | 0,025644026 | 0,012433 | -0,0323258 |

Tabelle 6-2 zeigt die kraftabhängige Dehnung, die für eine Probenbreite von 25 mm im Zugversuch bestimmt wurde (zweite Spalte von links). Kleine Kräfte unterhalb 1 N waren aufgrund der normbedingten Vorspannkraft von 1 N nicht messbar – in der Tabelle durch einen Stern gekennzeichnet. Die elastische Dehnung wurde weiterhin für eine Elektrodenbahnbreite von 65 mm berechnet (zweite Spalte von rechts) sowie die sich durch die elastische Dehnung ergebende Längendifferenz für 260 mm Elektrodenblattlänge (rechte Spalte). Für die zugrundeliegende Elektrode und wirkenden Prozesskräfte ergibt sich eine Längendifferenz von bis zu $-32,3 \mu\text{m}$.

6.2.2 Materialverhalten in der freien Bahnlänge

In diesem Abschnitt soll das Materialverhalten in der freien Bahnlänge untersucht werden. Dazu gehört neben der Betrachtung der Homogenität in Bahn längs- und Bahnquerrichtung auch der Durchhang der Materialbahn im nicht gestützten Bereich. Die Untersuchungen beziehen sich ebenfalls auf die eingangs vorgestellte Referenzelektrode.

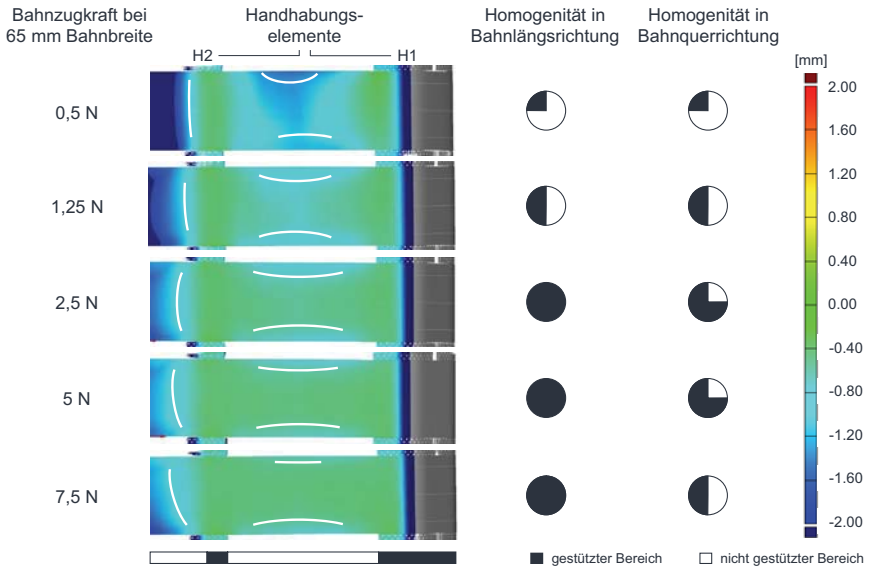


Abbildung 6-4: 3D-Scan der Elektrodenbahn bei der Kontaktherstellung unter verschiedenen Bahnzugkräften, Abweichungsdarstellung in Bildebene

Qualitative Betrachtung

Abbildung 6-4 zeigt eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Bahnzugkraft und dem Zustand der Elektrodenbahn im nicht gestützten Bereich. Dieser wird in die freie Bahnlänge der einlaufenden Materialbahn und die freie Bahnlänge zwischen den Handhabungselementen H2 und H1 unterteilt. Die freie Bahnlänge im einlaufenden Bereich ist deutlich größer, wodurch sich Unterschiede dort verstärkt zeigen.

Auf Basis der Analyse der farblichen Abweichungsdarstellung eignen sich Bahnzugkräfte zwischen 2,5 und 5 N für die 65 mm breite Anodenbahn am besten, da die Inhomogenität im nicht gestützten Bereich dann minimal ist. Zu niedrige Bahnzugkräfte verursachen ein Durchhängen der Materialbahn, zu hohe Bahnzugkräfte Inhomogenität aufgrund der limitierten Steifigkeit des Aufbaus.

Quantitative Betrachtung

Die Zustände der Elektrodenbahn sollen folgend in Bezug auf die sich ergebenden Längendifferenzen hin quantifiziert werden. Der Untersuchungsbereich ist die freie Bahnlänge zwischen den Handhabungselementen H2 und H1, welche sich bei einer Einzelblattlänge von 260 mm auf eine Distanz von 125,206 mm (Anteil von 48,16 % an der Gesamtblattlänge) beziffert. Um die zusätzliche Blattlänge die durch den Durchhang der Bahn entsteht zu ermitteln, wurde näherungsweise die Formel zur Berechnung der Kettenlinie herangezogen. Für die Länge l_k der Kettenlinie gilt

$$l_k = 2 * h * \left(\left(\frac{w}{2} * h \right)^2 + 1 \right) * \tanh \left(\frac{2h}{w} \right) \quad 6-1$$

mit h für den Durchhang und w für die für den Abstand zwischen den beiden Handhabungselementen. Diese Vorgehensweise kann laut Uhrig (1961, S. 15) für den Verlauf bahnförmiger Materialien herangezogen werden – in seinem Fall Papier – sofern das Eigengewicht der Bahn über die Horizontalprojektion annähernd gleichverteilt (geringe Durchbiegung) und die Biegesteifigkeit des Materials vernachlässigbar gering ist.

Die Durchbiegung in Abbildung 6-4 ist für alle Bahnzugkräfte kleiner als 1 mm, weshalb das Eigengewicht als gleichmäßig verteilt angesehen werden kann. Die Biegesteifigkeit soll nachfolgend mit der von Papier verglichen werden.

Abbildung 6-5 zeigt einen Vergleich der Biegesteifigkeiten von handelsüblichem Papier mit 80 g/m² (~ 80 µm Dicke) mit den ermittelten Werten der Elektroden aus Kapitel 4.

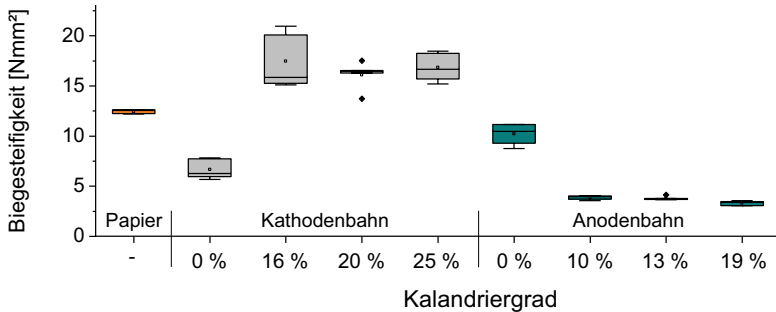


Abbildung 6-5: Biegesteifigkeit von Papier und unterschiedlichen Elektroden

Abbildung 6-5 veranschaulicht, dass die Biegesteifigkeit von Papier in derselben Größenordnung liegt wie die der Elektroden, oftmals sogar darüber. Das Heranziehen der obigen Berechnungsformel ist für eine näherungsweise Abschätzung somit plausibel.

Die Berechnungsformel wurde auf die Messungen in Abbildung 6-4 angewendet und die Längendifferenz $\Delta l_d = l - w$ berechnet, vgl. Tabelle 6-3. Für die Höhe h wurde das globale Maximum aller Punktabstände zum Nullpunkt (Referenzebene) verwendet, für den Abstand w die freie Bahnlänge zwischen den Handhabungselementen H1 und H2.

Tabelle 6-3: Einfluss des Bahndurchhangs auf die Elektrodenmaßhaltigkeit

| Bahnzugkraft [N] | Messung Durchhang [mm] (Mittel) | Längendifferenz bei 260 mm Blattlänge [mm] (berechnet) |
|------------------|---------------------------------|--|
| 0,5 | 0,842743 | 0,0108631 |
| 1,25 | 0,326578 | 0,0017373 |
| 2,5 | 0,162219 | 0,00043429 |
| 5 | 0,057166 | 0,00010857 |
| 7,5 | 0,038856 | 0,00004825 |

Aus der obigen Berechnung wird ersichtlich, dass der Einfluss der Bahnzugkraft in Bezug auf das Durchhängen der Materialbahn und die damit einhergehenden Blattlängenschwankungen sehr gering ist. Dies liegt insbesondere auch an der verhältnismäßig kurzen freien Bahnlänge, in der das Material überhaupt durchhängen kann.

6.2.3 Nachgiebigkeit der runden Grundplatte

Tabelle 6-4 stellt die Relativbewegung der runden Grundplatte zur Maschinengrundplatte an Messstelle (3), vgl. Abbildung 6-2, für unterschiedliche Bahnzugkräfte dar. Die Messung wurde mit einer digitalen Messuhr (MarCator 1075R) durchgeführt. Die Längendifferenzen wurden über entsprechende Hebelgesetze errechnet.

Tabelle 6-4: Nachgiebigkeit der runden Grundplatte

| Bahnzugkraft [N] | Bewegung des Rades [mm] | Längendifferenz HE absolut innen [mm] | Längendifferenz HE absolut außen [mm] | Mittlere Längendifferenz [mm] |
|------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 0,5 | 0,0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,25 | 0,0 | 0 | 0 | 0 |
| 2,5 | 0,002 | 0,000257 | 0,00097 | 0,00123 |
| 5 | 0,007 | 0,0009 | 0,0034 | 0,00215 |
| 7,5 | 0,011 | 0,00141 | 0,00534 | 0,00338 |

Für geringe Bahnzugkräfte ist der Einfluss auf die Bewegung des Handhabungselementes vernachlässigbar. Das Lager zur Befestigung der runden Grundplatte an der Maschinengrundplatte ist ausreichend steif ausgelegt, die Steifigkeit der runden Grundplatte ist ebenfalls ausreichend hoch.

6.2.4 Nachgiebigkeit des Gesamtaufbaus

Untersucht wird nachfolgend die Bewegung des Handhabungselementes (H1) samt Elektrodenbahn in vier verschiedenen Belastungssituationen, vgl. Abbildung 6-6. Die Nachgiebigkeit aus der Lagerung der runden Grundplatte sowie der runden Grundplatte selbst spielen, gemäß Kapitel 6.2.3, eine untergeordnete Rolle. Die Effekte können folglich auf die Nachgiebigkeit des Hybrid-Linearaktuators, des Handhabungselementes und die Relativbewegung der Elektrodenbahn zum Greifer zurückgeführt werden.

Für die Messung wurden 12 Markierungen auf der Elektrodenbahn aufgebracht, deren Relativbewegung mit dem ATOS Triple Scan System unter verschiedenen Bahnzugkräften aufgezeichnet wurde. Die Messungen zeigen, dass eine Erhöhung der Bahnzugkraft zu einer Bewegung des Materials in Richtung der wirkenden Bahnzugkraft führt. Von Bedeutung ist dabei weniger die absolute Bewegung, da diese über die Steuerung angepasst werden kann, sondern die Homogenität in Bahnquerrichtung.

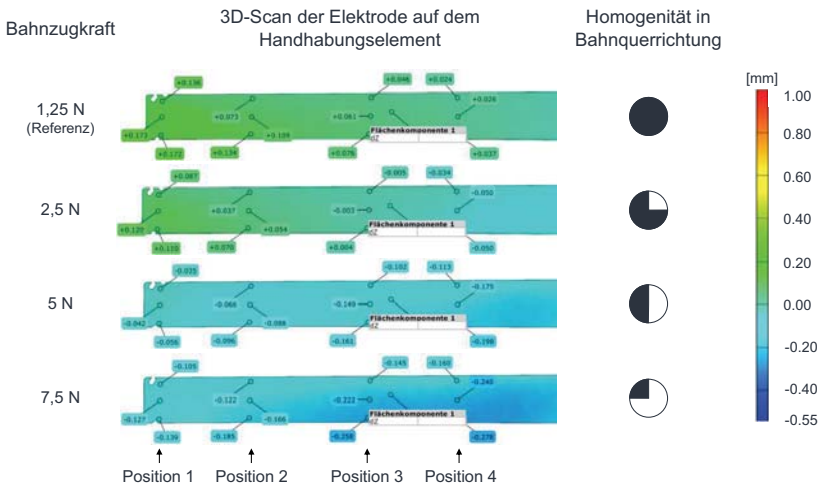


Abbildung 6-6: 3D-Scan der Elektrodenbahn auf dem Handhabungselement, Abweichungsdarstellung in Richtung der Bahnzugkraft

Die nachstehende Auswertung, vgl. Abbildung 6-7, zeigt die Relativbewegung des Materials für drei unterschiedliche Bahnzugkräfte zur Referenzposition bei 1,25 N. Dabei wird deutlich, dass sich die Messpunkte-Front auf zwei verschiedene Arten bewegt.

Für geringe Bahnzugkräfte (2,5 N) kommt es offenbar zu einer Relativbewegung des Materials, da sich Messposition 4 stärker ändert als Messposition 1. Diese kann durch eine Bewegung des Handhabungselementes alleine nicht erklärt werden, da dieses einseitig angeflanscht ist und durch den größeren Hebel an Position 1 eine größere Bewegung erfahren sollte. **Für höhere Bahnzugkräfte** (5 N und 7,5 N) ist hingegen zu erkennen, dass die Bewegung an den von der Befestigung weiter entfernten Messpositionen (Position 1 und 2) stärker zunimmt.

Die optimale Bahnzugkraft darf einerseits nicht zu gering sein, da geringe Bahnzugkräfte zunächst zu einer Ausrichtung des Materials am Greifer führen (hier wirkt noch kein Vakuum) und andererseits nicht zu hoch, um eine Schiefstellung des Handhabungselementes zu vermeiden.

Basierend auf den Messungen ergibt sich eine Längenkompensation in der Größenordnung der horizontal verlaufenden Linien (5 N = +0,19 mm | 7,5 N = +0,26 mm).

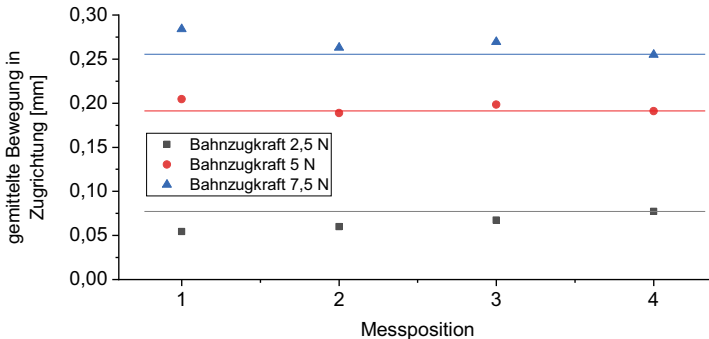


Abbildung 6-7: Gemittelte Bewegung der Materialbahn auf dem Handhabungselement in Bahnzugrichtung

6.3 Ableitung von Prozesskennfeldern

In diesem Kapitel werden für das Referenzmaterial (Anodenbahn) Prozessfenster in Abhängigkeit von Elektrodenblattlänge, -breite und des wirkenden Bahnzugs hergeleitet. Dafür einbezogen werden die elastische Dehnung des Materials, dessen Durchhang in der freien Bahnlänge sowie die Nachgiebigkeit des Handhabungselementes.

Für die Längenänderung Δl_{el} der Elektrodenbahn durch elastische Dehnung gilt

$$\Delta l_{el} = \frac{1}{E} * \frac{F_B}{b_{Folie} * d_{Folie}} * l_0 \quad 6-2$$

mit E für den E-Modul der Kupferfolie aus Abbildung 6-3, F_B für die Bahnzugkraft, b_{Folie} für die Breite der Materialbahn, d_{Folie} für die Dicke der Kupferfolie und l_0 für die vorgegebene Elektrodenblattlänge. Aufgrund der geringen Bahnzugkräfte wurde für die elastische Dehnung näherungsweise mit den Kenngrößen und Eigenschaften der Kollektorfolie (Kupferfolie) gerechnet.

Für die Längenänderung Δl_d der Elektrodenbahn aufgrund des Durchhangs in der freien Bahnlänge respektive den Bahndurchhang h gilt

$$h = \frac{m_A * b_{Elektrode} * g * w}{8 * F_B} \quad 6-3$$

mit m_A für das Flächengewicht der Elektrodenbahn ($*0,267 \text{ kg/m}^2$), $b_{Elektrode}$ für die Breite der Anodenbahn, g für die Fallbeschleunigung, w für die für den Abstand zwischen den beiden Handhabungselementen und F_B für die Bahnzugkraft.

Dieser Zusammenhang wurde für die Referenzelektrode experimentell nachgewiesen, vgl. Abbildung 6-8.

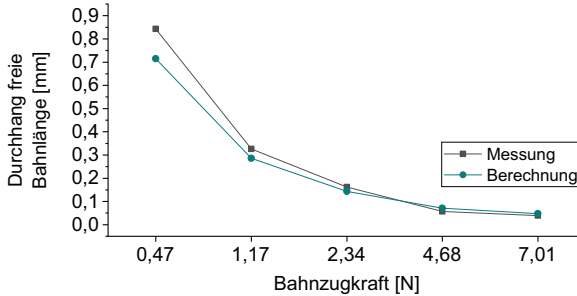


Abbildung 6-8: Vergleich des gemessenen und berechneten Bahndurchhangs in der freien Bahnlänge

Für die Berechnung der Kettenlinienlänge gelten die Zusammenhänge aus Gleichung 6-1. Die Längendifferenz ergibt sich, wie bereits beschrieben, über $\Delta l_d = l - w$.

Für die Bewegung des Handhabungselementes Δl_H gilt, gemittelt über alle Messpunkte im obigen Szenario, näherungsweise folgender Zusammenhang:

$$\Delta l_H = -0,0338 * F_B \quad 6-4$$

Es gilt die Annahme, dass die Bahnzugkraft in der Mitte der Bahnbreite angreift und die Bahnkante in einem Abstand von 33 mm zur Drehachse liegt, vgl. Abbildung 6-9.

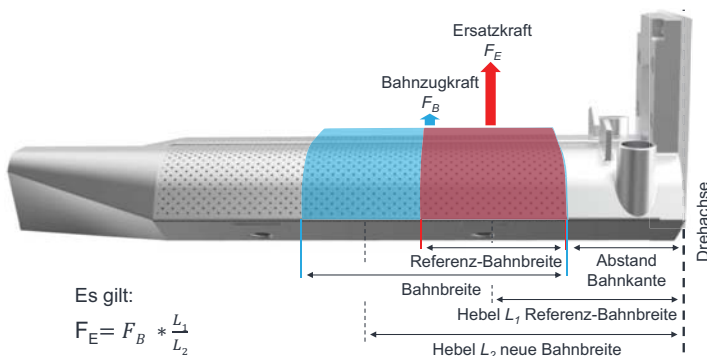


Abbildung 6-9: Berechnung der Ersatzkraft für verschiedene Bahnbreiten

Um den Effekt unterschiedlicher Bahnbreiten und Bahnzugkräfte auf die Bewegung des Handhabungselementes abzuschätzen, wird über die Zusammenhänge aus Abbildung 6-9 eine Ersatzkraft berechnet und in Gleichung 6-4 eingesetzt. Die Drehachse wird im Mittelpunkt der Aufnahme der Linearführung angenommen.

Das linke Diagramm in Abbildung 6-10 zeigt die kumulative Längenänderung für ein 65 mm breites Elektrodenblatt in Abhängigkeit der Elektrodenblattlänge und Bahnzugkraft. Das rechte Diagramm zeigt die Längenänderung für ein Elektrodenblatt mit 260 mm Länge in Abhängigkeit der Elektrodenblattbreite (Bahnbreite) und Bahnzugkraft.

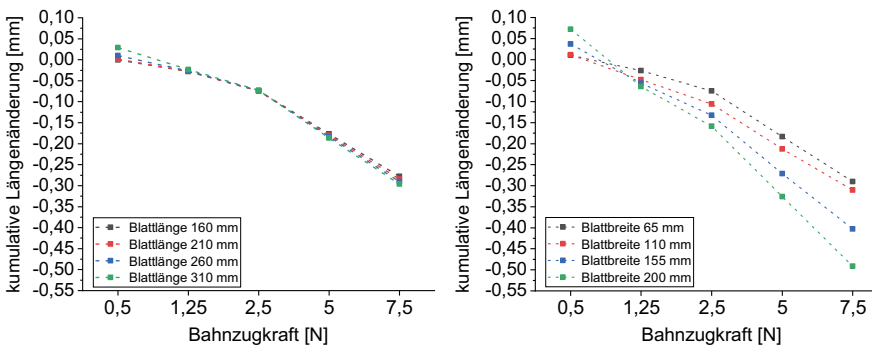


Abbildung 6-10: Kumulative Längenänderung in Abhängigkeit des Elektrodenformates und der Bahnzugkraft

Für das Referenzmaterial ist eine Bahnzugkraft im Bereich von 2,5 bis 5 N – isoliert für das Vereinzlungsergebnis betrachtet – optimal, da hier keine Relativbewegung zwischen Greifer und Handhabungselement stattfindet und gleichzeitig die Nachgiebigkeit des Handhabungselementes durch den Bahnzug gering ist, vgl. Kapitel 6.2.4.

Der für diesen Kraftbereich notwendige Korrekturfaktor kann nun in der Steuerung hinterlegt werden. Dieser erlaubt die prädiktive Korrektur der Elektrodenblattlängenänderung aufgrund material- und anlagenbedingter Einflüsse. Der **Korrekturfaktor entspricht dem invertierten Wert aus Abbildung 6-10** und muss auf die Nennelektrodenblattlänge addiert werden. Dieser ist insbesondere abhängig von der Bahnzugkraft und Elektrodenblattbreite, weniger von der eingestellten Elektrodenblattlänge, vgl. Abbildung 6-10.

7 Validierung und Bewertung

In diesem Kapitel erfolgt eine Evaluierung der Positioniergenauigkeit der Elektrodenblätter auf der Stapelstation. Des Weiteren erfolgen Genauigkeitsmessungen am Aufbau sowie an den erzeugten Einzelblattelektroden. Zum Ende des Kapitels hin werden die ermittelten Genauigkeiten mit denen kommerzieller Anlagen verglichen, um eine vergleichende Bewertung des Anlagenmoduls zu ermöglichen.



Abbildung 7-1: Vorgehensweise zur Erreichung der Zielstellung in Kapitel 7

Die Validierung erfolgt an einer Anodenbahn mit 125 mm Bahnbreite sowie anhand zweier Elektrodenblattlängen von 160 und 260 mm. Für die Parametrierung der Anlage werden die in Kapitel 6 ermittelten Bahnzugkräfte und Korrekturfaktoren berücksichtigt. Da die Elektrodenblattlänge keinen maßgeblichen Einfluss auf den Korrekturfaktor hat, vgl. Abbildung 6-10, wird dieser mit +0,2 mm für beide Längen identisch gewählt. Aufgrund der geringen Abhängigkeit der Elektrodenblattlänge von der Bahnzugkraft, werden beide Elektrodenblattlängen unter 5 N Bahnzugkraft hergestellt.

7.1 Genauigkeitsmessungen

In Abschnitt 7.1 wird zunächst die Maßhaltigkeit des Handhabungselementes selbst evaluiert. Im Anschluss erfolgt eine Untersuchung der Planlaufgenauigkeit der runden Grundplatte. Das Ziel der anlagenseitigen Genauigkeitsmessungen liegt in der Möglichkeit der Korrelation von Anlagen- und Produkttoleranzen. Abschließend erfolgt eine Betrachtung der Positioniergenauigkeit der Einzelblätter auf der Stapelstation sowie eine Evaluierung der Elektrodenblattmaßhaltigkeit.

Die Angabe der Toleranz für die Elektrodenmaßhaltigkeit, Positioniergenauigkeit und Schnittkantengenauigkeit erfolgt als Mittenmaß unter Angabe der Streuung, um diese mit den Herstellerangaben kommerzieller Anlagen vergleichen zu können. Ergänzend dazu wird ein Wahrscheinlichkeitsdiagramm zur Abschätzung der über die Messreihen hinaus zu erwartenden Toleranzen erzeugt.

7.1.1 Handhabungselement (SLM-Druck)

Das funktionsintegrierte Handhabungselement ist ein wesentlicher Bestandteil des Anlagenkonzeptes. Seine geometrische Gestalt hat unmittelbaren Einfluss auf den Zustand der Materialbahn (z.B. Faltenbildung), die Positionierung der Materialbahn zum Schneidwerkzeug sowie die Kontaktpunktausprägung bei der Materialübergabe.

Um Effekte hinsichtlich der Maßhaltigkeit und Positioniergenauigkeit der Elektrodenblätter einordnen zu können, wurde eine 3D-Messung mit dem ATOS Triple Scan System durchgeführt. Der Soll-Ist-Flächenvergleich des 3D-Scans mit der CAD-Datei des Handhabungselementes ergibt nachfolgende farbige Abweichungsdarstellung.

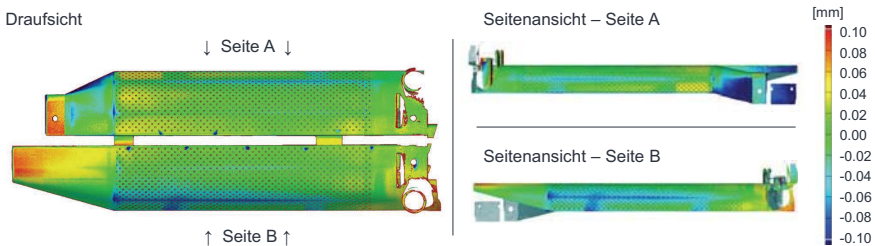


Abbildung 7-2: 3D-Messung des im SLM-Druckverfahren hergestellten Handhabungselementes

Die Abweichung der Ist-Geometrie (SLM-Druck) von der Soll-Geometrie (CAD) liegt, global betrachtet, im Bereich kleiner $\pm 0,1$ mm. Für den Prozess qualitätsbeeinflussend ist dabei insbesondere die Genauigkeit der Greifer-Wirkfläche. Da diese nachträglich mit einem Diamantschleifstein plan geschliffen wurde, ist deren Genauigkeit mit Abweichungen im Bereich von etwa $+0,04$ bis $-0,08$ mm relativ hoch. Als Mittenmaß unter Angabe der Streuung lässt sich die Toleranz der Wirkfläche auf $\pm 0,06$ mm beziffern.

7.1.2 Handhabungssystem

Das Handhabungselement ist, wie in Kapitel 5 dargestellt, über eine Linearachse auf einer runden Grundplatte montiert. Diese ist wiederum über eine Hohlwelle und eine weitere Linearführung und Aufnahme an der Maschinengrundplatte befestigt. Neben den Handhabungselementen hat besonders der Planlauf der runden Grundplatte einen Einfluss auf den Bewegungsablauf des Handhabungselementes beim Ablagevorgang.

Deshalb soll dieser nachfolgend genauer betrachtet werden. Die Planlaufgenauigkeit wurde dabei an der äußeren Rückseite der runden Grundplatte gemessen, vgl. Abbildung 7-3 links.

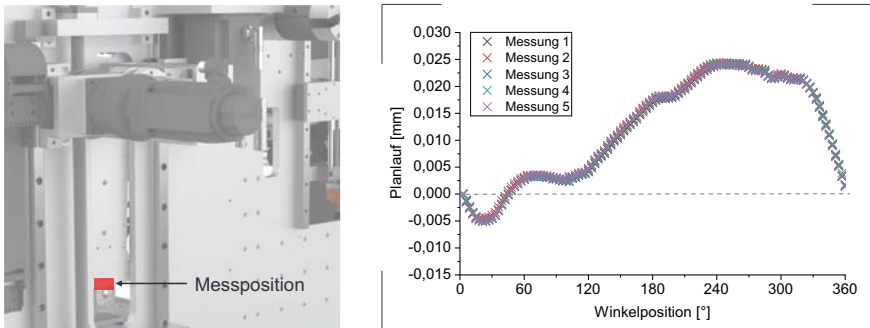


Abbildung 7-3: Messung der Planlaufgenauigkeit

Dazu wurde die Messuhr an der Maschinengrundplatte befestigt und die äußere Position der Grundplatte angetastet. Der Plot des Planlaufs über die Winkelposition, vgl. Abbildung 7-3 rechts, verdeutlicht, dass die runde Grundplatte insgesamt eine hohe Ebenheit aufweist. Darüber hinaus lässt der geringe Planlauffehler von $\pm 0,015$ mm auf eine hohe Senkrechtigkeit zwischen Hohlwelle und Grundplatte schließen.

7.1.3 Elektrodeneinzelblätter

In diesem Abschnitt wird auf die Positioniergenauigkeit des Anlagenmoduls sowie die erzielten Elektrodenblattmaßhaltigkeiten und Schnittqualitäten eingegangen. Darüber hinaus wird der Zusammenhang zwischen Positionier- und Maßhaltigkeit dargestellt.

7.1.3.1 Positioniergenauigkeit

Die Positioniergenauigkeit des Anlagenmoduls wurde bestimmt, indem der Abstand der Elektrodenblattkante zu einer festen Referenzmarkierung auf dem Stapeltisch gemessen wurde. In Bahnlaufrichtung erfolgte die Messung in einem Abstand von $Y1=10$ mm, $Y2=65$ mm und $Y3=115$ mm zur Referenzbahnkante. In Bahnlaufrichtung wurde lediglich ein Messpunkt im Abstand von $X=10$ mm zur Schnittkante erfasst. Die nachfolgende Abbildung 7-4 veranschaulicht die vier Messpositionen.

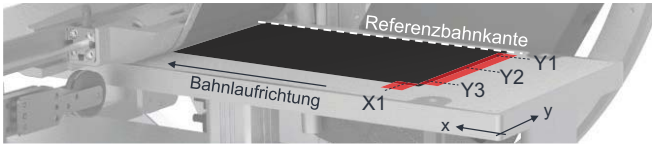


Abbildung 7-4: Abbildung zu den Messpositionen zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit der Elektrode auf der Stapelstation

Positionsabweichung in Bahnlaufriichtung

Abbildung 7-5 zeigt die Ergebnisse der Messung an den drei Messstellen Y1, Y2 und Y3. Diese sind, wie von den Anlagenherstellern auch, als angrenzende Positioniergenauigkeit und Gesamtpositioniergenauigkeit der Endflächen ausgewiesen und wurden unter Zuhilfenahme einer Referenzposition ermittelt.

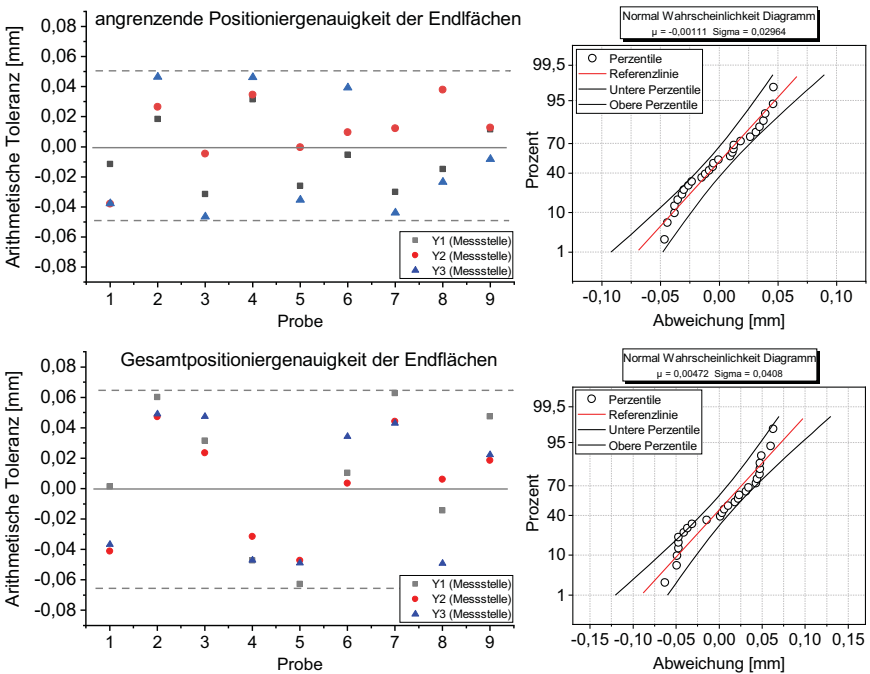


Abbildung 7-5: Positioniergenauigkeit der Elektrodenblätter auf der Stapelstation (links), Wahrscheinlichkeitsdiagramm der Abweichung (rechts)

Die **angrenzende Positioniergenauigkeit der Endflächen** („adjacent end-phase accuracy“) liegt für alle 27 Messwerte innerhalb einer Toleranz von **$\pm 0,05$ mm** zum Mittenabstand. Dabei ist zu erkennen, dass die Messwerte an den äußeren Messstellen Y1 und Y3 stärker streuen als die Messwerte in der Elektrodenblattmitte (Y2). Dies hängt mit dem Einfluss von Winkelfehlern (Orientierungsabweichungen) zusammen und verdeutlicht die Abhängigkeit der Genauigkeitsangabe von der gewählten Messstelle.

Die **Gesamtpositioniergenauigkeit der Endflächen** („overall end-phase accuracy“) liegt erwartungsgemäß oberhalb der Genauigkeit der angrenzenden Endflächen. Analog zur obigen Auswertung ist auch hier die Toleranz an den äußeren Messstellen größer als in der Elektrodenblattmitte. Die Toleranz der Gesamtgenauigkeit der Endflächen in Bahnlaufrichtung kann mit **$\pm 0,07$ mm** zum Mittenabstand angegeben werden.

Die Messwerte wurden zudem auf deren Verteilung hin geprüft – sie unterliegen einer Normalverteilung. Das Wahrscheinlichkeitsdiagramm erlaubt eine Einschätzung der zu erwartenden Genauigkeiten des Anlagenmoduls in Bahnlaufrichtung. Das Modell respektive der Verlauf der Referenzlinie schätzt die Positionierung der **angrenzenden Endflächen** auf **$\pm 0,07$ mm** zum 1% Niveau. Die **Gesamtpositioniergenauigkeit der Endflächen** wird modellseitig auf **$\pm 0,09$ mm** zum 1 % Niveau geschätzt. Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten aus der Schätzung selbst, kann mit 80%-iger Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die Genauigkeiten auf jeden Fall innerhalb der angegebenen Perzentile liegen.

Positionsabweichung in Bahnquerrichtung

Die Genauigkeit an der Messstelle X1 wird maßgeblich durch den Drehrahmen bestimmt. Im reellen Aufbau konnte diese nur auf Bedienerseite erfasst werden, da der Platz zur Positionierung des Messsystems auf Maschinenseite nicht ausreichend gegeben war, um die Kante einwandfrei mit dem optischen Messsystem (ATOS Triple Scan System der Fa. GOM) zu erfassen.

Die gemessene Positioniergenauigkeit beträgt hier **$\pm 0,25$ mm**, was einen gängigen Wert für die Ausrichtung bahnförmiger Materialien in Wickelmaschinen darstellt. Es sei darauf verwiesen, dass die Angabe Bahnbreitenschwankungen aus dem Prozessschritt „Slitting“ beinhaltet und keine Aussage über die Positionierung der Bahnkante an der Messstelle zulässt.

Maßabweichungen

Nachfolgend ausgewertet wird die Elektrodenmaßhaltigkeit in Bahnlaufrichtung (Elektrodenblattlänge), da die Elektrodenblattbreite über den Zuschnitt des Elektroden-Coils bestimmt ist. Das Elektroden-Coil wurde im vorhergehenden Prozessschritt „Slitting“ erzeugt und stellt keine Kenngröße des entwickelten Anlagenmoduls dar.

Zur Evaluierung der Maßhaltigkeit wurden insgesamt 18 Elektroden Einzelblätter mit einer Länge von 160 (blaue Punkte) bzw. 260 mm (rote Punkte) vereinzelt, vgl. Abbildung 7-6. Die Vermessung der Elektroden Einzelblätter erfolgte automatisiert mithilfe des optischen Messsystems O-Inspect der Fa. Zeiss.

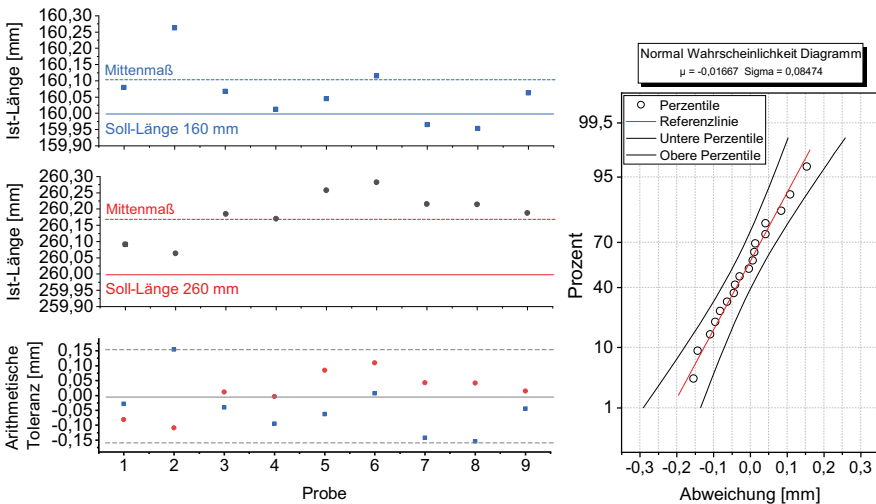


Abbildung 7-6: Maßgenauigkeit der geschnittenen Elektrodenblätter in Bahnlaufrichtung und Häufigkeitsverteilung der Maßabweichung

Für kurze **Blattlängen von 160 mm** zeigt sich, dass diese ein Mittenmaß von 160,11 mm und eine arithmetische **Toleranz von ± 0,16 mm** aufweisen. Das Übermaß von 0,11 mm kann material- oder anlagenseitige Ursachen haben und über einen weiteren Korrekturfaktor steuerungsseitig berücksichtigt werden.

Für **Blattlängen von 260 mm** wird deutlich, dass diese in Bezug auf deren Mittenmaß stärker von der Soll-Länge abweichen, nämlich um 0,17 mm, die arithmetische **Toleranz mit ± 0,11 mm** allerdings leicht unterhalb der kürzeren Blattlänge zu verorten ist.

Prinzipiell ist eine höhere positive Abweichung des Mittenmaßes aufgrund der höheren Elektrodenblattlänge zu erwarten, vgl. Abbildung 6-10. Auch diese kann über einen Korrekturfaktor in der Steuerung adressiert werden um die Soll-Länge zu erhalten.

Ergänzend zu den Messungen wurde ein Wahrscheinlichkeitsdiagramm zur Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeiten erstellt. Das Modell respektive der Verlauf der Referenzlinie schätzt die Blattlängentoleranz auf kleiner $\pm 0,2$ mm zum 1% Niveau.

7.1.3.2 Zusammenhang zwischen Positions- und Maßabweichungen

Im nachfolgenden Diagramm dargestellt sind die Positions- und Maßabweichungen für die Messungen der Elektrodenblattlänge von 260 mm. Die Positionsabweichungen sind pro Probe über die drei Messwerte (Y1, Y2, Y3) gemittelt dargestellt (rot). Die Maßabweichungen sind hier, unter der Annahme einer symmetrischen Verteilung des Blattlängenübermaßes zu beiden Seiten, hälftig berücksichtigt (dunkelgrau).

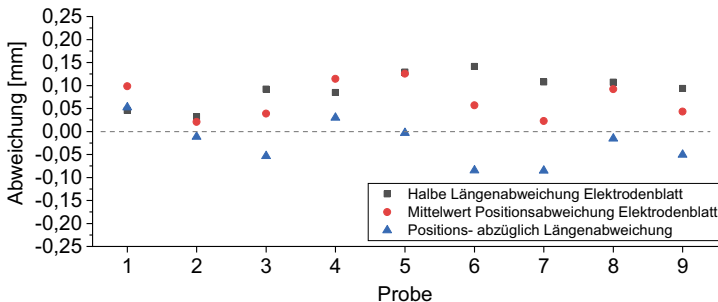


Abbildung 7-7: Zusammenhang zwischen der Maßabweichung der Elektrodenblätter und der korrespondierenden Ablageposition

Für die Darstellung in Abbildung 7-7 wurde weiterhin die Positionsabweichung in Bahnaufrichtung hälftig um die Längenabweichung in Bahnaufrichtung bereinigt, wodurch sich die blauen Dreiecke „Positions- abzüglich Längenabweichung“ ergeben. Die Darstellung verdeutlicht den signifikanten Einfluss der Zuschnittgenauigkeit auf die zu erreichende Positioniergenauigkeit. Zieht man die hälftige Längenabweichung des Elektrodenblattes vom korrespondierenden Messwert der Ablageposition ab, streuen die Werte (blaue) annähernd symmetrisch um den Mittenabstand.

Nach der Bereinigung der Ablageposition um die Maßabweichung des Elektrodenblattes und unter der obigen Annahme einer symmetrischen Verteilung, ergibt sich eine Gesamtpositioniergenauigkeit der Elektroden-Endflächen von etwa $\pm 0,042$ mm. Dieser

Wert beinhaltet etwaige Effekte bei der Blattübergabe (Handhabungselement-Stapelstation) sowie die Genauigkeit des mechanischen Aufbaus und der Synchronisation des Bewegungsablaufs.

7.1.3.3 Schnittqualität

Die Schnittqualität ist definiert als die „Abweichung der Ist-Schnittflächen von der ebenen, lagerichtigen Soll-Schnittfläche“ (Feiler 1970, S. 14). Die kritischen Bereiche liegen im Allgemeinen beim Eintritt des Messers in das Schnittgut sowie im letzten Teil des Schnittes, aufgrund der dort ausgeprägteren Reißphase. Abbildung 7-8 veranschaulicht den Verlauf der beiden Schnittflächen an jeweils 5 Messreihen sowie einer lichtmikroskopischen Aufnahme für die Schnittkante auf Seiten des Rund- bzw. Langmessers.

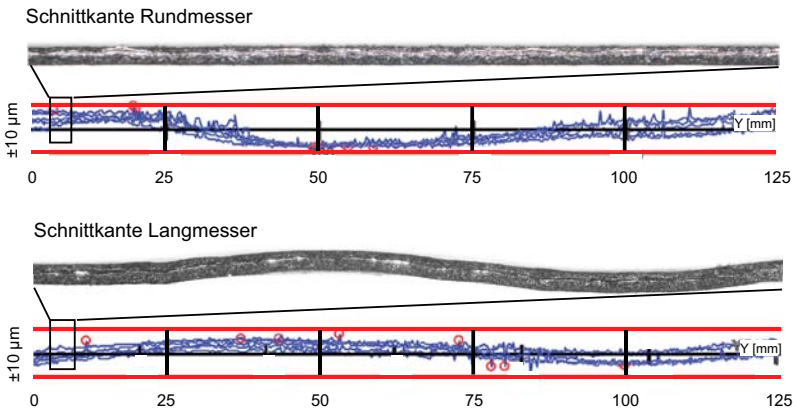


Abbildung 7-8: Schnittqualität der vereinzelt Elektrodenblätter über die Bahnweite von 125 mm

Die Abbildung zeigt, dass die Schnitte (N=5) mit einer Abweichung von kleiner $\pm 10 \mu\text{m}$ über deren Schnittlänge von 125 mm sehr geradlinig verlaufen. Die Schnittkanten verhalten sich dabei weitestgehend komplementär zueinander. Der Schnittverlauf weist darüber hinaus einen eindeutigen Trend über die Bahnweite auf, welcher mutmaßlich in geometrischen Ungenauigkeiten des Handhabungselementes, vgl. Abbildung 7-2, bzw. Einflüssen der Langmesser-Montage begründet ist – die Schnitte wurden stets am selben Messerpaar durchgeführt. Die Schnittgrate („cutting burrs“) beziffern sich auf max. $5 \mu\text{m}$ (Langmesserseite) bzw. max. $8 \mu\text{m}$ (Rundmesserseite).

7.2 Bewertung der Genauigkeiten

In diesem Abschnitt sollen die erzielten Genauigkeiten des flexiblen Anlagenmoduls mit denen kommerzieller Anlagen verglichen werden.

7.2.1 Vergleich mit kommerziellen Vereinzelmaschinen

Der in Bezug auf die Elektrodenmaßhaltigkeit in Bahnlaufrichtung relevante Prozessschritt ist, wie in Kapitel 2 beschrieben, das Vereinzeln. Folglich sind die Genauigkeitsangaben der Hersteller von Vereinzelmaschinen heranzuziehen. Die Herstellerangaben für die **Elektrodenmaßhaltigkeit** in Bahnlaufrichtung liegen im Bereich zwischen $\pm 0,2$ und $\pm 0,3$ mm. Die durchschnittliche Schnittlänge der Anlagen beträgt dabei 241,6 mm und liegt folglich geringfügig unterhalb der betrachteten Länge von 260 mm. Im Vergleich zu kommerziellen Anlagen, weist das entwickelte Anlagenmodul mit einer Blattlängentoleranz von kleiner **$\pm 0,2$ mm** eine sehr hohe Präzision im Zuschnitt auf.

Der in Bezug auf die **Schnittqualität** technologisch vergleichbare Prozessschritt ist das Längsschneiden (Slitting). Herstellerseitig wird die Länge der Grate, meist als „maximal cutting burr“ bezeichnet, in einem Bereich zwischen 6 und 10 μm angegeben. Das entwickelte Anlagenmodul liegt mit **max. 8 μm** hierbei im Mittelfeld.

7.2.2 Vergleich mit kommerziellen Stapelmaschinen

Die arithmetische Toleranz liegt, je nach Hersteller, zwischen $\pm 0,15$ und $\pm 0,5$ mm und ist dabei insbesondere von der eingesetzten Technologie zur Ausrichtung abhängig. Der Durchschnitt der gemittelten möglichen Blattlängen und -breiten liegt dabei bei 141 bzw. respektive 220 mm und folglich in einer ähnlichen Größenordnung wie die gegenwärtige Elektrodenblattdimension von 125 x 260 mm. Mit einer abgeschätzten Positioniergenauigkeit in Bahnlaufrichtung von **$\pm 0,07$ mm**, weist das Verfahren eine sehr hohe Präzision auf und erfüllt die eingangs gestellten Anforderungen. An dieser Stelle sei nochmals auf die Materialabhängigkeit dieser Angabe verwiesen, sowie auf die Ermittlung der Stapelgenauigkeit anhand einer Referenzposition und die Abwesenheit von Effekten in Bezug auf die Stapelnachgiebigkeit und den Klemmvorgang.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Eine der größten Herausforderungen bei der Planung neuer Werke besteht für die Zellhersteller und deren Kunden in der frühzeitigen Festlegung auf ein spezifisches Zellformat. Begründet liegt dies in der Rigidität gegenwärtiger Anlagentechnik und der Notwendigkeit zur Optimierung der Maschinenauslastung. Änderungen des Zellformates sind im Rahmen des anlagenspezifischen Bearbeitungsspektrums zwar möglich, führen allerdings zu immensen Rüstaufwänden und Stillstandszeiten. Ein Formatwechsel kann zudem zu einem sub-optimalen Betriebspunkt der Produktionslinie führen.

Eine besondere Rolle spielen in diesem Zusammenhang die Vereinzelung und Stapelbildung, da die Anzahl an Einzelkomponenten in diesen Prozessschritten stark ansteigt und damit auch die notwendige Anlagenanzahl. Dies führt zu immensen Anpassungsaufwänden sowie zu einer hohen Komplexität und aufwendigen Intralogistik in diesen Prozessen.

Die Zielstellung dieser Arbeit lag folglich in der methodischen Entwicklung eines flexiblen und kontinuierlich arbeitenden Anlagenmoduls, welches die Prozessschritte Vereinzelung und Stapeln integriert, um eine hohe Flexibilität bei reduzierter Komplexität zu ermöglichen. Die Vorgehensweise zur Zielerreichung orientierte sich an der VDI 2221, welche auf einer Zerlegung des Gesamtproblems in Teil- und Einzelprobleme basiert.

Das Gesamtproblem wurde in Kapitel 2 beleuchtet. Dabei wurde dargelegt, dass der Zellproduktionsprozess fortwährenden Optimierungen, hinsichtlich des Materials und Zellformates, unterliegt und die Anlagentechnik in der Lage sein muss agil und flexibel auf diese zu reagieren. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Maschinen über diskrete Bearbeitungsspektren verfügen, welche lediglich einen Teilbereich des existierenden Zellportfolios adressieren.

In Kapitel 4 wurden die Teilprobleme genauer analysiert. Dies erfolgte über eine Identifikation von Hauptfunktionen in Vereinzelungs- und Stapelmaschinen sowie eine Analyse geschwindigkeits-, genauigkeits- und flexibilitätslimitierender Faktoren. Die Untersuchung der Einzelprobleme erfolgte im Rahmen von Anlage-Material-Wechselwirkungen mit einem Schwerpunkt auf mechanische und geometrische Eigenschaftsänderungen. Zum Ende des Kapitels hin wurden Prämissen abgeleitet und ein erstes Grobkonzept für eine flexible, kontinuierliche und integrierte Lösung vorgestellt.

Auf Basis der Prämissen erfolgte schließlich die Erarbeitung von Einzellösungen, welche zu Teillösungen und schließlich einer Gesamtlösung integriert wurden.

Im Rahmen von Kapitel 5 wurden dazu Einzellösungen für zentrale Komponenten des Grobkonzepts erarbeitet. Zur Auslegung und Funktionsabsicherung wurden ergänzende Vorversuche sowie technologiespezifische Recherchen durchgeführt. Die Einzellösungen wurden in Teillösungen integriert, um ein funktionsintegriertes, flexibles und kontinuierlich arbeitendes Handhabungssystem umzusetzen. Das Handhabungssystem wurde schließlich in eine Gesamtlösung eingebettet, welche die kontinuierliche Vereinzelung und Positionierung von Einzelblattelektroden ermöglicht.

Die Gesamtlösung beinhaltet weiterhin die Identifikation von Prozessfenstern in Kapitel 6 für die nachfolgenden Validierungsversuche.

In Kapitel 7 erfolgte schließlich die Validierung der Funktionsweise am realen Aufbau. Nachgewiesen wurde die Maßhaltigkeit und Positioniergenauigkeit der Elektrodenblätter für zwei verschiedene Elektrodenblattlängen sowie die Schnittqualität. Es konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Anlagenmodul sowohl in Bezug auf die Elektrodenblattmaßhaltigkeit, die Positioniergenauigkeit als auch die Schnittqualität sehr hohe Genauigkeiten erzielt und im oberen Bereich kommerzieller Anbieter zu verorten ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges Verfahren zur kontinuierlichen und flexiblen Vereinzelung und Stapelbildung hergeleitet. Die Herleitung erfolgte auf einer detaillierten Analyse des weitestgehend unzugänglichen Standes der Technik sowie auf der experimentellen Untersuchung von Wirkzusammenhängen. Die Erkenntnisse dienten anschließend zur ganzheitlichen Gestaltung der Verfahrensführung und Auslegung der Einzel- und Teilkomponenten.

Das Verfahren wurde weiterhin in einem Versuchsaufbau realisiert, welcher dem Technology Readiness Level (TRL) 4 entspricht. Es konnte in Kapitel 7 nachgewiesen werden, dass dieser in der Lage ist Elektrodeneinzelblätter variabler Länge exakt zu vereinzelnd und diese präzise auf dem Stapeltisch zu positionieren.

Die entwickelte Lösung bietet Zellherstellern und Kunden eine höhere Flexibilität bei der Anpassung von Zellformaten gegenüber dem Stand der Technik und dem Sondermaschinenbau eine Perspektive, sich mit einer flexiblen Maschinenlösung in einem bestehenden Wettbewerbsumfeld behaupten zu können.

8.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein neues Anlagenprinzip systematisch hergeleitet, mit dem Ziel, die Funktionsfähigkeit des neuartigen Anlagenmoduls nachzuweisen und dessen Potenziale aufzuzeigen.

Die Untersuchung der Verarbeitungsgeschwindigkeit stellte dabei keinen Schwerpunkt dar, weshalb eine einfache traversierende Stapelstation im prototypischen Aufbau integriert wurde. Diese diente lediglich dem Funktionsfähigkeitsnachweis und stellte keinen Bestandteil der erdachten Gesamtlösung dar. Die Weiterentwicklung des Prototyps und der Aufbau einer Gesamtlösung („EXINOS“) ist Gegenstand des Folgeprojektes E-Qual, welches im Rahmen des ProZell 2 Clusters bearbeitet wird. Dort soll die Stapelstation durch ein kontinuierlich angetriebenes Vakuumpörderband ersetzt werden, welches die Elektrodenblätter auf eine Separatorbahn transferiert. Bedingt durch die hohe Flexibilität des Moduls in Bezug auf die Elektrodenblattlänge, -breite und Ablageposition können unterschiedlichste Verbundbauweisen realisiert werden.

Weiteres Potenzial besteht in der Optimierung des mechanischen Aufbaus. Die Nachgiebigkeit des Handhabungssystems im Gesamtaufbau ist der wichtigste Einflussfaktor in Bezug auf die kumulative Längenänderung in Abhängigkeit der Bahnzugkraft. Messungen haben gezeigt, dass diese durch den Hybrid-Linearaktuator induziert wird. Demzufolge sollte der Folgeaufbau einen Linearaktuator mit nochmals höherer Steifigkeit beinhalten. Weiterhin kann das Handhabungselement kompakter gestaltet werden, um das Bearbeitungsspektrum in Bezug auf die Elektrodenblattlänge nach unten erweitern zu können. Auch diese beiden Aspekte sollen im Folgeprojekt adressiert werden.

Ein weiterer Forschungsgegenstand ist die Implementierung digitaler Zwillinge zum Zweck der Anlagenauslegung und Parametrierung. Die Untersuchungen in Kapitel 5 und Kapitel 6 haben gezeigt, dass es in Abhängigkeit der Hauptfunktion (Führen, Halten etc.) optimale Parameter gibt, letztlich aber die Qualität des Endproduktes (Elektrodenblatt) über die Wahl der Prozessparameter entscheidet. Die Vorhersage von parameterabhängigen Produktqualitäten über den Einsatz digitaler Zwillinge kann helfen das notwendige Spektrum der Anlagenparameter weiter einzuzugrenzen, um die Auslegung der Komponenten möglichst optimal gestalten und so auch die Kosten der Anlage minimieren zu können.

9 Literaturverzeichnis

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

(A_Frech 2020)

A_Frech, C. (2020), *Materialcharakterisierung und simulative Analyse des Stapelbildungsprozesses für die Lithium-Ionen Zellproduktion*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Hahn 2020)

A_Hahn, L. (2020), *Materialcharakterisierung und simulative FEM-Analyse des Stapelbildungsprozesses für die Zellproduktion*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Karl 2018)

A_Karl, F. (2018), *Identifikation von Wirkzusammenhängen für die Prozessierung von Separatoren und Elektroden in der Lithium-Ionen Batterieproduktion*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Kreuer 2019)

A_Kreuer, N. (2019), *Konstruktion und Aufbau eines hochintegrierten Handhabungs- und Schneidsystems zur Stapelbildung von Li-Ionen Pouchzellen*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Lin 2019)

A_Lin, Y. (2019), *Identifikation von Einflussfaktoren auf die Ablagegenauigkeit von Elektroden und Separatoren in der Einzelblattstapelbildung von Li-Ionen Pouchzellen*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Schmidgruber 2020)

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

(A_Zhang 2019)

A_Zhang, Y. (2019), *Implementierung eines funktionalen Modells in Abaqus zur*

Identifikation von Wirkzusammenhängen in der Materialführung für Batterieelektroden, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Ahn & Lee et al. 2004)

Ahn, S.; Lee, H.-M.; Lee, S.-J.; Park, Y.; Kim, J. Y.; Lee, J.-H.; Kim, S. K. & Cho, J. Y. (2004), *The Impact of Cell Geometries and Battery Designs on Safety and Performance of Lithium Ion Polymer Batteries*, Report, LG Chemical Ltd., Korea, erhältlich über: <https://www.electrochem.org/dl/ma/203/pdfs/0106.pdf>, zuletzt abgerufen 2021-05-15.

(Arora & Zhang 2004)

Arora, P. & Zhang, Z. (2004), "Battery Separators", *Chem. Rev.*, 104(10), S. 4419–4462, DOI: 10.1021/cr020738u.

(Babinec & Less et al. 2014)

Babinec, S. J.; Less, G. B. & Vieau, D. (2014), "Laminated battery cell comprising multilayer composite separator and methods for creating the same", amerikanisches Patent US8697290B2, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/US8697290B2/en>, zuletzt abgerufen 2021-12-02.

(Bach 2017)

Bach, G. (2017), "Beitrag zur Produktivitätssteigerung in der Massenherstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen", Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Technische Universität Berlin, Berlin, DOI: 10.14279/depositon-5879.

(Ballinger & Stringer et al. 2019)

Ballinger, B.; Stringer, M.; Schmeda-Lopez, D. R.; Kefford, B.; Parkinson, B.; Greig, C. & Smart, S. (2019), "The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply", *Applied Energy*, 255(113844), S. 1–9, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113844.

(Bauer 2019)

Bauer, W. (2019), "Besonderheiten der Pulvertechnologie bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien", *Keramische Zeitschrift*, 71, S. 42–27, DOI: 10.1007/s42410-018-0055-2.

(Baumann & Lasagni et al. 2019)

Baumann, R.; Lasagni, A. F.; Herwig, P.; Wetzig, A.; Leyens, C. & Beyer, E. (2019), "Efficient separation of battery materials using remote laser cutting—high output performance, contour flexibility, and cutting edge quality", *Journal of Laser Applications*, 31(2), S. 1–8, DOI: 10.2351/1.5096127.

(Baumeister & Fleischer 2014)

Baumeister, M. & Fleischer, J. (2014), "Integrated cut and place module for highproductive manufacturing of lithium-ion cells", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(1), S. 5–8, DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.063.

(Baumeister 2017)

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

(Benson 2002)

Benson, R. C. (2002), "Lateral Dynamics of a Moving Web with Geometrical Imperfection", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 124(1), S. 25–34, DOI: 10.1115/1.1435643.

(Bhardwaj & Devan et al. 2013)

Bhardwaj, R. C.; Devan, S. & Whang, T. (2013), "Increasing the stiffness of battery cells for portable electronic devices", amerikanische Patentanmeldung US20130095357A1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/US20130095357A1/en>, zuletzt abgerufen 2021-05-21.

(Birke 2014)

Birke, P. (2014), "Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Diskussion der verschiedenen Zellformate", *ATZ Elektronik*, 9(6), S. 38–43, DOI: 10.1365/s35658-014-0505-6.

(Blomgren 2017)

Blomgren, G. E. (2017), "The Development and Future of Lithium Ion Batteries", *Journal of The Electrochemical Society*, 164(1), S. 5019–5025, DOI: 10.1149/2.0251701jes.

(Bockholt & Haselrieder et al. 2016)

Bockholt, H.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2016), "Intensive powder mixing for dry

dispersing of carbon black and its relevance for lithium-ion cathodes", *Powder Technology*, 297, S. 266–274, DOI: 10.1016/j.powtec.2016.04.011.

(Bockholt & Indrikova et al. 2016)

Bockholt, H.; Indrikova, M.; Netz, A. & Golks, F. (2016), "The interaction of consecutive process steps in the manufacturing of lithium-ion battery electrodes with regard to structural and electrochemical properties", *Journal of Power Sources*, 325, S. 140–151, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.05.127.

(Ceder & Van der Ven et al. 1998)

Ceder, G.; Van der Ven, A. & Aydinol, M. K. (1998) "Lithium-Intercalation Oxides for Rechargeable Batteries", *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 50(9), S. 35–40, erhältlich über: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11837-998-0412-5.pdf>, zuletzt abgerufen 2022-05-15.

(Czichos 2015)

Czichos, H. (2015), *Mechatronik - Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme*, 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, DOI: 10.1007/978-3-658-09950-3.

(Deimede & Elmasides 2015)

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

(Diehm & Weinmann et al. 2020)

Diehm, R.; Weinmann, H.; Kumberg, J.; Schmitt, M.; Fleischer, J.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2019), "Edge Formation in High-Speed Intermittent Slot-Die Coating of Disruptively Stacked Thick Battery Electrodes", *Energy Technology*, 8(2), S. 1–8, DOI: 10.1002/ente.201900137.

(DIN 2003a)

DIN 53362:2003-10 (2003), Prüfung von Kunststoff-Folien und von textilen Flächengebilden (außer Vliesstoffe), mit oder ohne Deckschicht aus Kunststoff - Bestimmung der Biegesteifigkeit - Verfahren nach Cantilever; Beuth Verlag, Berlin.

(DIN 2003b)

DIN 8588:2003-09 (2003), Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe; Beuth Verlag, Berlin.

(Duffner & Mauler et al. 2021)

Duffner, F.; Mauler, L.; Wentker, M.; Leker, J. & Winter, M. (2021), "Large-scale automotive battery cell manufacturing: Analyzing strategic and operational effects on manufacturing costs", *International Journal of Production Economics*, 232, S. 1–19, DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107982.

(Endo & Kim et al. 2001)

Endo, M.; Kim, Y. A.; Hayashi, T.; Nishimura, K.; Matusita, T.; Miyashita, K. & Dresselhaus, M. S. (2001), "Vapor-grown carbon fibers (VGCFs) - Basis properties and their battery applications", *Carbon*, 39(9), S. 1287–1297, DOI: 10.1016/S0008-6223(00)00295-5.

(Feiler 1970)

Feiler, M. (1970), "Ein Beitrag zur Klärung der Vorgänge beim Schneiden dünner flächiger Materialien", Dissertation, Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Universität Stuttgart (TH) 1970, o.A. Verlag, o.A. Verlagsort.

(Fleischer & Ruprecht et al. 2012)

Fleischer, J., Ruprecht, E., Baumeister, M., Haag, S. (2012). "Automated Handling of Limp Foils in Lithium-Ion-Cell Manufacturing", in *Leveraging Technology for a Sustainable World*, Dornfeld, D. & Linke, B. (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-642-29069-5_60

(Fleischer & Weinmann et al. 2021)

Fleischer, J.; Weinmann, H. W. & Storz, T. (2021), "Wettbewerbsvorteile durch agile Zellproduktion", unveröffentlichter Vortrag auf dem Batterieforum Deutschland 2021, Online Kongress, 2. Februar 2021.

(Font & Protas et al. 2018)

Font, F.; Protas, B.; Richardson, G. & Foster, J. M. (2018), "Binder migration during drying of lithium-ion battery electrodes: modelling and comparison to experiment", *Journal of Power Sources*, 393, S.1–24, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.04.097.

(Fröhlich & Leithoff et al. 2018)

Fröhlich, A.; Leithoff, R.; Boeselager, C.; Dröder, K. & Dietrich, F. (2018), "Investigation of particulate emissions during handling of electrodes in lithium-ion battery assembly", *Procedia CIRP*, 78, S. 341–346, 6th CIRP Global Web conference, 23.-25. October 2018, DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.322.

(Goodenough & Abruna et al. 2007)

Goodenough, J.; Abruna, H. D. & Buchanan, M. V. (2007), *Basic Research Needs for Electrical Energy Storage*, Report, Office of Basic Energy Sciences, U.S. Department of Energy, Washington D.C, Vereinigte Staaten, erhältlich über: <https://www.osti.gov/servlets/purl/935429>, zuletzt abgerufen 2021-08-20.

(Götz 1991)

Götz, R. (1991), "Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile", Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-662-10128-5.

(Günther & Schreiner et al. 2020)

Günther, T.; Schreiner, D.; Metkar, A.; Meyer, C.; Kwade, A. & Reinhart, G. (2020), "Classification of Calendering-Induced Electrode Defects and Their Influence on Subsequent Processes of Lithium-Ion Battery Production", *Energy Technology*, 8(2), S. 1–9, DOI: 10.1002/ente.201900026.

(Gupta & Ücel et al. 2020)

Gupta, P.; Ücel, I. B.; Gudmundson, P. & Olsson, E. (2020), "Characterization of the Constitutive Behavior of a Cathode Active Layer in Lithium-Ion Batteries Using a Bending Test Method", *Experimental Mechanics*, 60(6), S. 847–860, DOI: 10.1007/s11340-020-00613-5.

(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.

(Haselrieder & Westphal et al. 2015)

Haselrieder, W.; Westphal, B.; Bockholt, H.; Diener, A.; Höft, S. & Kwade, A. (2015), "Measuring the coating adhesion strength of electrodes for lithium-ion batteries", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 60, S. 1–8, DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.03.002.

(Haselrieder 2016)

Haselrieder, W. (2016), *Kalandrierung zur gezielten Einstellung der Batterieelektroden-Performance*, Dissertation, ser. Schriftreihe des Instituts für Partikeltechnik,

Technische Universität Braunschweig, Sierke Verlag, Göttingen, ISBN: 987-3-86844-942-6.

(Hashimoto 2007)

Hashimoto, H. (2007), "Prediction model of paper-web wrinkling and some numerical calculation examples with experimental verifications", *Microsystem Technologies*, 13(8), S. 933–941, DOI: 10.1007/s00542-007-0388-z.

(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*, Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen University, Aachen, ISBN: 978-3-947920-00-6.

(Hesse & Schimpe et al. 2017)

Hesse, H. C.; Schimpe, M.; Kucevic, D. & Jossen, A. (2017), "Lithium-Ion Battery Storage for the Grid - A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids", *Energies*, 10(12), S. 1–42, DOI: 10.3390/en10122107.

(Hesse 2011)

Hesse, S. (2011), *Greifertechnik. Effektoren für Roboter und Automaten*, Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-42422-7.

(Hettesheimer & Wietschel et al. 2020)

Hettesheimer, T.; Wietschel, M.; Neef, C.; Stijepic, D.; Moll, C.; Thielmann, A.; Ter-cero, E. L. & Joachimsthaler, C. (2020), *Batteriestandort auf Klimakurs - Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland*, Fraunhofer-Allianz Batterien, Pfnztal, erhältlich über: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/batteriestandort-auf-klimakurs/>, zuletzt abgerufen 2021-11-02.

(Hettesheimer & Thielmann et al. 2017)

Hettesheimer, T.; Thielmann, A.; Neef, C.; Möller, C.; Wolter, M.; Lorentz, V.; Gepp, M.; Wenger, M.; Prill, T.; Zausch, J.; Kitzler, P.; Montnacher, J.; Miller, M.; Hagen, M.; Fanz, P. & Tübke, J. (2017), *Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität*, Fraunhofer-Allianz Batterien,

Pfintzal, erhältlich über: https://www.batterien.fraunhofer.de/content/dam/batterien/de/documents/Allianz_Batterie_Zellformate_Studie.pdf, zuletzt abgerufen 2022-05-02.

(Jaiser & Friske et al. 2017)

Jaiser, S.; Friske, A.; Baunach, M.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2017), "Development of a three-stage drying profile based on characteristic drying stages for lithium-ion battery anodes", *Drying Technology*, 35(10), S. 1266–1275, DOI: 10.1080/07373937.2016.1248975.

(Jansen & Amine et al. 2002)

Jansen, A. N.; Amine, K.; Newman, A. E.; Vissers, D. R. & Hendriksen, G. L. (2002), "Low-Cost, Flexible battery Packaging Materials", *JOM*, 54(3), S. 29–54, DOI: 10.1007/BF02822616.

(Jansen & Kandula et al. 2020)

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

(Jiang & Zhang 2015)

Jiang, J. & Zhang, C. (2015), *Fundamentals and Applications of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles*, 1. Auflage, Wiley & Sons Verlag, Nashville, Vereinigte Staaten, ISBN: 978-1-118-41478-1.

(Johnson Matthey 2015)

Johnson Matthey Battery Systems (2015), *Our Guide to Batteries*, 3. Auflage, Johnson Matthey Battery Systems, Vereinigtes Königreich, erhältlich über: <https://energystorage-cdt.ac.uk/publications-and-reports/Johnson+Matthey+Battery+Guide.pdf>, zuletzt abgerufen 2021-04-03.

(Jung & Kim et al. 2016)

Jung, W.; Kim, H. K.; Kim, M. & Lee, K.-J. (2016), "Spatial Measurement of Heat Generation in a Pouch-Type Lithium-Ion Battery", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(8), S. 1085–1089, DOI: 10.1007/s12541-016-0132-7.

(Jung & Park et al. 2018)

Jung, A. R.; Park, J. W. & Ahn, C. B. (2018), "Electrode assembly and method for

manufacturing same", europäisches Patent EP2869387B1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/EP2869387B1/en>, zuletzt abgerufen 2021-11-12.

(Kaiser & Wenzel et al. 2014)

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

(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 Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 237–248, DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2_18.

(Ketterer & Karl et al. 2009)

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

(Kim & Geh et al. 2013)

Kim, J.-S.; Geh, K.-H. & Tae, M.-H. (2013), "Secondary battery electrode panel stacking guide system", koreanische Patentanmeldung KR20130087718A, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR20130087718A/en>, zuletzt abgerufen 2021-09-21.

(Kim & Geh et al. 2016)

Kim, J.-S. & Geh, K.-H. (2016), "Electrode plate stacking device for secondary battery, having improved pole stacking efficiency", internationale Patentanmeldung WO2016080635A1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/WO2016080635A1/en>, zuletzt abgerufen 2021-10-22.

(Kim & Geh et al. 2018)

Kim, J.-S. & Geh, K.-H. (2018), "Secondary electrode stacking machine with enhanced abnormal electrode selection efficiency and working speed", koreanisches Patent KR101842147B1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR101842147B1/en>, zuletzt abgerufen 2021-10-22.

(Kim & Go 2013a)

Kim, J.-S. & Go, K.-H. (2013), "Electrode plate stamping device for secondary battery", internationale Patentanmeldung WO2013115506A1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/WO2013115506A1/en>, zuletzt abgerufen 2021-10-09.

(Kim & Go 2013b)

Kim, J.-S. & Go, K.-H. (2013), "Secondary battery electrode panel cutter assembly", koreanische Patentanmeldung KR20130091928A, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR20130091928A/en>, zuletzt abgerufen 2021-10-07.

(Kim & Go 2014a)

Kim, J.-S. & Go, K.-H. (2014), "Secondary battery electrode cleaning apparatus", koreanische Patentanmeldung KR20140037402A, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR20140037402A/en>, zuletzt abgerufen 2021-10-05.

(Kim & Go 2014b)

Kim, J.-S. & Go, K.-H. (2014), "Secondary battery electrode panel cutter assembly", koreanische Patentanmeldung KR20130125002A, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR20130125002A/en>, zuletzt abgerufen 2021-10-05.

(Kim & Kang et al. 2016)

Kim, J.-S.; Kang, D.-H.; Lee, C.-H.; Park, Y.-P. & Kim, S.-S. (2016), "Pouch for rechargeable battery, fabricating method of the same, and rechargeable battery including the pouch", amerikanisches Patent US9327432B2, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/US9327432B2/en>, zuletzt abgerufen 2021-09-28.

(Kim & Kwon 2013)

Kim, J.-S. & Kwon, O.-K. (2013), "Secondary battery electrolytic liquid filling machine", koreanisches Patent KR101296339B1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR101296339B1/en>, zuletzt abgerufen 2021-10-24.

(Kim & Noh et al. 2020)

Kim, J.-S.; Noh, S.-W. & Park, J.-Y. (2020), "Secondary battery electrode stacking and detachment type magazine", koreanische Patentanmeldung KR20200070923A, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR20200070923A/en>, zuletzt abgerufen 2021-09-24.

(Kim & Hisajima 2014)

Kim, T. & Hisajima, K. (2014), "Battery, manufacturing method for battery, and stacked electrode", europäisches Patent EP2696425B1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/EP2696425B1/en>, zuletzt abgerufen 2021-03-03.

(Kim 2015)

Kim, S.-Y. (2015), "Stack-type cell, enhanced bi-cell, electrode assembly for secondary battery using same, and manufacturing method therefor", europäisches Patent EP2557626B1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/EP2557626B1/en>, zuletzt abgerufen 2021-11-24.

(Kim 2017)

Kim, T.-W. (2017), "Apparatus for Manufacturing Cell Stack for Secondary Battery", koreanisches Patent KR101730469B1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR101730469B1/en>, zuletzt abgerufen 2021-11-07.

(Kim & Go et al. 2021)

Kim, J. S.; Go, K.-H. & Kim, T. (2021), "Electrode derailment correction apparatus by electrode automatic tension adjustment and electrode derailment correction method thereby", koreanisches Patent KR102210392B1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR102210392B1/en>, zuletzt abgerufen 2021-11-07.

(Kitajima & Motoi et al. 2017)

Kitajima, K.; Motoi, M.; Nomura, K.; Yamamoto, S. & Kato, T. (2017), "Roll press machine and roll press method", japanische Patentanmeldung JP2017084545A, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/JP2017084545A/en>, zuletzt abgerufen 2021-11-08.

(Kovachev & Schröttner et al. 2019)

Kovachev, G.; Schröttner, H.; Gstrein, G.; Aiello, L.; Hanzu, I.; Wilkening, H. M. R.; Foitzik, A.; Wellm, M.; Sinz, W. & Ellersdorfer, C. (2019), "Analytical Dissection of an Automotive Li-Ion Pouch Cell", *Batteries*, 5(67), S. 1–19, DOI: 10.3390/batteries5040067.

(Kriegler & Binzer et al. 2020)

Kriegler, J.; Binzer, M. & Zaeh, M. F. (2020), "Process strategies for laser cutting of electrodes in lithium-ion battery production", *Journal of Laser Applications*, 33(1), S. 1–8, DOI: 10.2351/7.0000335.

(Kronthaler & Schloegl et al. 2012)

Kronthaler, M. R.; Schloegl, F.; Kurfer, J.; Wiedenmann, R.; Zaeh, M. F. & Reinhart, G. (2012), "Laser Cutting in the Production of Lithium Ion Cells", *Physics Procedia*, 39, S. 213–224, DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.032.

(Kurfer & Westermeier et al. 2012a)

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, DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.101.

(Kurfer & Westermeier et al. 2012b)

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*, 61(1), 4th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, Ann Arbor, Michigan, Vereinigte Staaten, 20.-22. Mai 2012, S. 33–37, DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.101.

(Kwade & Haselrieder 2018)

Kwade, A.; Haselrieder, W.; Leithoff, R.; Modlinger, A.; Dietrich, F. & Droeder, K. (2018), "Current status and challenges for automotive battery production technologies", *Nature Energy*, 3(4), S. 290–300, DOI: 10.1038/s41560-018-0130-3.

(Landesfeind & Eldiven et al. 2018)

Landesfeind, J.; Eldiven, A. & Gasteiger, H. A. (2018), "Influence of the Binder on Lithium Ion Battery Electrode Tortuosity and Performance", *Journal of The Electrochemical Society*, 165(5), S. 1122–1128, DOI: 10.1149/2.0971805jes.

(Lee & Oh et al. 2019)

Lee, D.; Oh, B. & Suk, J. (2019), "The Effect of Compactness on Laser Cutting of Cathode for Lithium-Ion Batteries Using Continuous Fiber Laser", *Applied Sciences*, 9(1), S.1–16, DOI: 10.3390/app9010205.

(Lestriez 2010)

Lestriez, B. (2010), "Functions of polymers in composite electrodes of lithium ion batteries", *Comptes Rendus Chimie*, 13(11), S. 1341–1350, DOI: 10.1016/j.crci.2010.01.018.

(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, DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2_2.

(Lin & Mote 1996)

Lin, C. C. & Mote, C. D. (1996), "Eigenvalue solutions predicting the wrinkling of rectangular webs under non-linearly distributed edge loading", *Journal of Sound and Vibration*, 197(2), S. 179–189, DOI: 10.1006/jsvi.1996.0524.

(Liu & Zhang et al. 2021)

Liu, Y.; Zhang, R.; Wang, J. & Wang, Y. (2021), "Current and future lithium-ion battery manufacturing", *iScience*, 24(4), S. 1–17, DOI: 10.1016/j.isci.2021.102332.

(Löbberding & Wessel et al. 2020)

Löbberding, H.; Wessel, S.; Offermanns, C.; Kehrer, M.; Rother, J.; Heims, H. & Kampker, A. (2020), "From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types", *World Electric Vehicle Journal*, 11(4), S. 1–15, DOI: 10.3390/wevj11040077.

(Loveridge & Remy et al. 2018)

Loveridge, M. J.; Remy, G.; Kourra, N.; Genieser, R.; Barai, A.; Lain, M. J.; Amor-Segan, M.; Williams, M. A.; Amietszajew, T.; Ellis, M.; Bhagat, R. & Greenwood, D. (2018), "Looking deeper into the Galaxy (Note 7)", *Batteries*, 4(3), S. 1–11, DOI: 10.3390/batteries4010003.

(Luetke & Franke et al. 2011)

Luetke, M.; Franke, V.; Techel, A.; Himmer, T.; Klotzbach, U.; Wetzig, A. & Beyer, E. (2011), "A Comparative Study on Cutting Electrodes for Batteries with Laser", *Physics Procedia*, 12, S. 289–291, DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.135.

(Lukubira & Ogale 2016)

Lukubira, S. & Ogale, A. (2016), "Processing, Mechanical and Morphological Properties of Calendered Polypropylene-Discontinuous Carbon Fiber Composites", *Conference SAMPE*, Long Beach, California, Vereinigte Staaten, 23.-26. Mai 2016, S. 1–10, erhältlich über: <https://www.researchgate.net/publication/308122154>, zuletzt abgerufen 2022-07-22.

(Lutey & Fortunato et al. 2014)

Lutey, A. H. A.; Fortunato, A.; Ascari, A.; Carmignato, S. & Leone, C. (2014), "Laser cutting of lithium iron phosphate battery electrodes: Characterization of process efficiency and quality", *Optics & Laser Technology*, 65, S. 164–174, DOI: 10.1016/j.optlastec.2014.07.023.

(Maeda & Shinyashiki et al. 2012)

Maeda, H.; Shinyashiki, Y.; Donoue, K. & Fujiwara, M. (2012), "Stack type battery and method of manufacturing the same", europäische Patentanmeldung EP2482368A1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/EP2482368A1/en>, zuletzt abgerufen 2021-09-20.

(Manthiram 2020)

Manthiram, A. (2020), "A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry", *Nature Communications*, 11(1), S. 1–9, DOI: 10.1038/s41467-020-15355-0.

(Matsumura & Murata et al. 2013)

Matsumura, J.; Murata, H.; Tsuneyoshi, T. & Sato, R. (2013), "Device for inspecting edge surface of laminated sheet material", japanische Patentanmeldung JP2013181832A, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/JP2013181832A/en>, zuletzt abgerufen 2021-10-02.

(Mayer & Bockholt et al. 2017)

Meyer, C.; Bockholt, H.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2017), "Characterization of the calendaring process for compaction of electrodes for lithium-ion batteries", *Journal of Materials Processing Technology*, 249, S. 172–178, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.031.

(Michaelis & Rahimzei et al. 2018)

(Michaelis, S.; Rahimzei, E.; Kampker, A.; Heimes, H.; Lienemann, C.; Offermanns, C.; Kehrler, M.; Thielmann, A.; Hettesheimer, T.; Neef, C.; Kwade, A.; Haselrieder, W.; Rahlfs, S.; Uerlich, R. & Bogner, N. (2018), *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030*, VDMA Verlag, Frankfurt am Main.

(Michaelis & Rahimzei et al. 2020)

(Michaelis, S.; Rahimzei, E.; Kampker, A.; Heimes, H.; Offermanns, C.; Locke, M.; Lobberding, H.; Wennemar, S.; Thielmann, A.; Hettesheimer, T.; Neef, C.; Kwade, A.; Haselrieder, W.; Blömeke, S.; Doose, S.; Drachenfels, N.; Drees, R.; Fröhlich, A.; Gottschalk, L.; Hoffmann, L.; Kouli, M.; Leithoff, R.; Rahlfs, S.; Rickert, J;

Schmidt, L. O.; Schoo, A.; Thomitzek, M.; Turetsky, A. & Vysoudil, F. (2020), *Roadmap Battery Production Equipment 2030*, VDMA Verlag, Frankfurt am Main.

(Min & Na et al. 2015)

Min, K. H.; Na, S. H. & Ban, J. H. (2015), "Device and method for stacking units for secondary battery", amerikanisches Patent US9160028B2, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/US9160028B2/en>, zuletzt abgerufen 2021-10-12.

(Müller & Pfaffmann et al. 2017)

Müller, M.; Pfaffmann, L.; Jaiser, S.; Baunach, M.; Trouillet, V.; Scheiba, F.; Scharfer, P.; Schabel, W. & Bauer, W. (2017), "Investigation of binder distribution in graphite anodes for lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, 340, S. 1–5, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.11.051.

(Nitta & Wu et al. 2014)

Nitta, N.; Wu, F.; Lee, J. T. & Yushin, G. (2014), "Li-ion battery materials: present and future", *Materials Today*, 15(5), S. 252–264, DOI: 10.1016/j.mat-tod.2014.10.040.

(Ōsawa & Yūichirō et al. 2013)

Ōsawa, S.; Yūichirō, M. & Shingo, N. (2013), "Electrode plate for rectangular nonaqueous electrolyte storage cell", internationale Patentanmeldung WO2013141279A1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/WO2013141279A1/en>, zuletzt abgerufen 2021-07-17.

(Park & Lim 2015)

Park, J.-Y. & Lim, J.-H. (2015), "Secondary battery electrode stacking machine", koreanische Patentanmeldung KR20150111551A, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/KR20150111551A/en>, zuletzt abgerufen 2021-09-05.

(Pettinger & Kampker et al. 2021)

Pettinger, K.-H.; Kampker, A.; Hohenthanner, C.-R.; Deutskens, C.; Heimes, H. & Hemdt, A. (2021), "Lithium-ion cell and battery production processes" in *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, 1. Auflage, Hrsg. R. Korthauer, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 212–225, DOI: 10.1007/978-3-662-53071-9_17.

(Pettinger 2013)

Pettinger, K.-H. (2013), "Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen" in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 221–236, DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2_17.

(Pfeiffer 1987)

Pfeiffer, J. (1987), "Mechanics and Dynamics of Web Motion between Spans", *American Control Conference 1987*, Minneapolis, MN, Vereinigte Staaten, 10.-12. Juni 1987, S. 2094–2099, DOI: 10.23919/ACC.1987.4789656.

(Pradeep & Sivasenthil et al. 2019)

Pradeep, N.; Sivasenthil, E.; Janarthanan, B. & Sharmila, S. (2019), "A Review of Anode Material for Lithium Ion Batteries", *Journal of Physics*, Conference Series, Eluru, India, 20.-22. Juni 2019, 1362(1), S. 1–16, DOI: 10.1088/1742-6596/1362/1/012026.

(Reinhart & Straßer 2011)

Reinhart, G. & Straßer, G. (2011), "Flexible gripping technology for the automated handling of limp technical textiles in composites industry", *Production Engineering (WGP)*, 5(3), S. 301–306, DOI: 10.1007/s11740-011-0306-1.

(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, 8.- 9. Juni 2011*, Hrsg. G. Schuh, R. Neugebauer & E. Uhlmann, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 3–12, DOI: 10.1007/978-3-642-24491-9_1.

(Riexinger & Doppler et al. 2020)

Riexinger, G.; Doppler, J. P.; Haar, C.; Trierweiler, M.; Buss, A.; Schöbel, K.; Ensling, D. & Bauernhansl, T. (2020), "Integration of Traceability Systems in Battery Production", *Procedia CIRP*, 93, 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems, Chicago, IL, Vereinigte Staaten, 1.-3. Juli 2020, S. 125–130, DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.002.

(Röth & Kampker et al. 2018)

Röth, T.; Kampker, A.; Deutskens, C.; Kreisköther, K; Himes, H. H.; Schittny, B.;

Ivanescu, S.; Büning, M. K.; Reinders, C.; Wessel, S.; Haunreiter, A.; Reisgen, U.; Thiele, R.; Hameyer, K.; Doncker, R. W.; Sauer, U.; Hoek, H.; Hübner, M.; Hennen, M.; Stolze, T.; Vetter, A.; Hagedorn, J.; Müller, D.; Rewitz, K.; Wesseling, M. & Flieger, B. (2018), "Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen" in *Elektromobilität*, Hrsg. A. Kampker, D. Vallée, A. Schnettler, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 279–387, DOI: 10.1007/978-3-662-53137-2_6.

(Rothermel & Winter et al. 2018)

Rothermel, S.; Winter, M.; Nowak, S. (2018), "Background" in *Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec way, 1. Auflage*, Hrsg. A. Kwade & J. Diekmann, Springer International Publishing, Schweiz, S. 1–32, DOI: 10.1007/978-3-319-70572-9.

(Ryu & Kwon et al. 2018)

Ryu, S.-M.; Kwon, S.-J.; Ahn, S.-H.; Kim, D.-M.; Kim, K. W. & Kim, Y.-H. (2018), "Stepwise electrode assembly having variously-shaped corner and secondary battery, battery pack and device comprising the same", europäisches Patent EP3139435B1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/EP3139435B1/en>, zuletzt abgerufen 2021-06-28.

(Samba & Omar et al. 2014)

Samba, A.; Omar, N.; Gualous, H.; Capron, O.; Van den Bossche, P. & Van Mierlo, J. (2014), "Impact of Tab Location on Large Format Lithium-Ion Pouch Cell Based on Fully Coupled Tree-Dimensional Electrochemical-Thermal Modeling", *Electrochimia Acta*, 147, S. 319–329, DOI: 10.1016/j.electacta.2014.08.115.

(Schäfer & Weinmann et al. 2020)

Schäfer, J.; Weinmann, H. W.; Mayer, D.; Storz, T.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2020), "Synergien zwischen Batterie- und Brennstoffzelle", *wt Werkstatttechnik online*, 110(10), S. 735–741, DOI: 10.37544/1436-4980-2020-10-91.

(Schilling & Schmitt et al. 2016)

Schilling, A.; Schmitt, J.; Dietrich, F. & Dröder, K. (2016), "Analyzing Bending Stresses on Lithium-Ion Battery Cathodes induced by the Assembly Process", *Energy Technology*, 4(12), S. 1502–1508, DOI: 10.1002/ente.201600131.

(Schmitt & Baunach et al. 2012)

Schmitt, M.; Baunach, M.; Wengeler, L.; Peters, K.; Junges, P.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2012), "Slot-die processing of lithium-ion battery electrodes - Coating

window characterization", *Chemical Engineering and Processing*, 68, S. 32–37, DOI: 10.1016/j.cep.2012.10.011.

(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, DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.018.

(Schmitt & Scharfer et al. 2013)

Schmitt, M.; Scharfer, P. & Schabel, W. (2013), "Slot die coating of lithium-ion battery electrodes: investigations on edge effect issues for stripe and pattern coatings", *Journal of Coatings Technology and Research*, 11(1), S. 57–63, DOI: 10.1007/s11998-013-9498-y.

(Schmitt 2015)

Schmitt, M. (2015), "Slot die coating of lithium-ion battery electrodes", Dissertation, TFT Institut für Thin Film Technology, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, ISBN: 978-3-7315-0477-1.

(Schmuck & Wagner et al. 2018)

Schmuck, R.; Wagner, R.; Höpkel, G.; Placke, T. & Winter, M. (2018), "Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries", *Nature Energy*, 3(4), S. 267–278, DOI: 10.1038/s41560-018-0107-2.

(Schröder & Aydemir et al. 2017)

Schröder, R.; Aydemir, M. & Seliger, G. (2017), "Comparatively assessing different shapes of lithium-ion battery cells", *Procedia Manufacturing*, 8, 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Stellbosch, South Africa, 3.-5. October 2016, S. 104–111, DOI: 10.1016/j.promfg.2017.02.013.

(Schünemann 2015)

Schünemann, J.-H. (2015), "Modell zur Bewertung von Herstellkosten von Lithiumionenbatteriezellen", Dissertation, Institut für Partikeltechnik, Technische Universität Braunschweig, Sierke Verlag, Göttingen, ISBN: 978-3-86844-703-3.

(Seshadri & Pagilla 2009)

Seshadri, A. & Pagilla, P. R. (2009), "Optimal Web Guiding", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 132(1), S. 1–10, DOI: 10.1115/1.4000074.

(Shelton 1968)

Shelton, J. J. (1968), "LATERAL DYNAMICS OF A MOVING WEB", Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, Vereinigte Staaten, erhältlich über:
<https://core.ac.uk/download/pdf/215186366.pdf>, zuletzt abgerufen 2021-08-20.

(Sheng & Fell et al. 2014)

Sheng, Y.; Fell, C. R.; Son, Y. K.; Metz, B. M.; Jiang, J. & Church, B. C. (2014), "Effect of calendaring on electrode wettability in lithium-ion batteries", *Frontiers in Energy Research*, 2(56), S. 1–8, DOI: 10.3389/fenrg.2014.00056.

(Shirakawa & Yokota et al. 2005)

Shirakawa, Y.; Yokota, N.; Togashi, T.; Ito, S. & Hanada, T. (2005), "Electrode lamination device and gauging device", japanische Patentanmeldung JP2005050583A, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/JP2005050583A/en>, zuletzt abgerufen 2020-04-20.

(Shirakawa & Yokota et al. 2010)

Shirakawa, Y.; Yokota, N.; Togashi, T.; Itō, K. & Hanada, T. (2010), "Electrode laminating apparatus and gauging apparatus", japanisches Patent JP4571384B2, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/JP4571384B2/en>, zuletzt abgerufen 2021-07-06.

(Simon 2013)

Simon, R. (2013), "Aufbau einer Fabrik zur Zellfertigung" in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 249–257, DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2_19.

(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. 1196–1201, DOI: 10.1149/2.0401507jes.

(Singh & Kaiser et al. 2016)

Singh, M.; Kaiser, J. & Hahn, H. (2016), "A systematic study of thick electrodes for high energy lithium ion batteries", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 782, S. 245–249, DOI: 10.1016/j.jelechem.2016.10.040.

(Son & Ryou et al. 2013)

Son, B.; Ryou, M.-H.; Choi, J.; Kim, S.-H.; Ko, J. M. & Lee, J. M. (2013), "Effect of

cathode/anode area ratio on electrochemical performance of lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, 243, S. 641–647, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.06.062.

(Springer & Frankenberger et al. 2020)

Springer, B. C.; Frankenberger, M. & Pettinger, K.-H. (2020), "Lamination of Separators to Electrodes using Electrospinning", *PLoS ONE*, 15(1), S. 1–6, DOI: 10.1371/journal.pone.0227903.

(Swanson 1999)

Swanson, R. P. (1999), "Mechanics of Non-Uniform Webs", Proceedings of the Fifth International Web Handling Conference, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, Vereinigte Staaten, 6.-9. Juni 1999, S. 443–459, erhältlich über: <https://shareok.org/handle/11244/321796>, zuletzt abgerufen 2021-09-21.

(Tang & Albertus et al. 2009)

Tang, M.; Albertus, P. & Newman, J. (2009), "Two-Dimensional Modeling of Lithium Deposition during Cell Charging", *Journal of The Electrochemical Society*, 156(5), S. 390–399, DOI: 10.1149/1.3095513.

(Thielmann & Neef et al. 2017)

Thielmann, A.; Neef, C.; Hettesheimer, T.; Döscher, H.; Wietschel, M. & Tübke, J. (2017), *Energiespeicher-Roadmap (Update 2017)*, "Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien", Hrsg. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, S. 1–124, erhältlich über: <https://batterie-2020.de/wp-content/uploads/2018/01/batterie-2020.de-energiespeicher-roadmap-2017-energiespeicher-roadmap-dezember-2017.pdf>, zuletzt abgerufen 2021-07-21.

(Thielmann & Wietschel et al. 2020)

Thielmann, A.; Wietschel, M.; Funke, S.; Grimm, A.; Hettesheimer, T.; Langkau, S.; Loibl, A.; Moll, C.; Neef, C.; Plötz, P.; Sievers, L.; Espinoza, L. T. & Edler, J. (2020), "Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf", Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Stober Verlag, Eggenstein, erhältlich über: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>, zuletzt abgerufen 2021-07-11.

(Uhrig 1961)

Uhrig, H. (1961), *Untersuchung der Spannungsverteilung und der Größe der Spannung im laufenden Papierstrang in Rotationsmaschinen*, Report, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD), Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, S. 1–35, DOI: 10.25534/tuprints-00014161.

(VDI 1993)

VDI (1993), *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, Nr. 2221.

(VDI 1990)

VDI (1990), *Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, Nr. 2860.

(Vuorilehto 2013)

Vuorilehto, K. (2013), "Materialien und Funktionen" in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 21–30; DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2_3.

(Watanabe & Yuhara et al. 2012)

Watanabe, M.; Yuhara, H. & Yamashita, M. (2012) "Lamination device and lamination method", internationale Patentanmeldung WO2012137917A1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/WO2012137917A1/en>, zuletzt abgerufen 2021-09-11.

(Weinmann & Fleischer 2019)

Weinmann, H. W. & Fleischer, J. (2019), "Influences of Increasing Coating Thicknesses and Calendering Degrees on Single Sheet Stack Formation", unveröffentlichter Vortrag, International Battery Production Conference 2019, 4.-5. November 2019, Braunschweig, Deutschland.

(Weinmann & Lang et al. 2018)

Weinmann, H. W.; Lang, F.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2018), "Bahnzugkraftregelung in der Batteriezellfertigung", *wt Werkstattstechnik online*, S. 519–524, DOI: 10.37544/1436-4980-2018-07-08.

(Weinmann & Töpfer et al. 2020)

Weinmann, H. W.; Töpfer, H.-C. & Fleischer, J. (2020), "Coil2Stack: Ein innovatives Verfahren zur formatflexiblen Batteriezellherstellung", *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115(4), S. 241–243, DOI: 10.3139/104.112192

(Westermeier & Reinhart et al. 2014)

Westermeier, M.; Reinhart, G. & Steber, M. (2014), "Complexity Management for the Start-up in Lithium-ion Cell Production", *Procedia CIRP 20*, 2nd International Conference on Ramp-Up Management 2014 (ICRM), Aachen, Germany, 12.-13. Juni 2014, S. 13–19, DOI: 10.1016/j.procir.2014.05.026.

(Westphal & Bockholt et al. 2015)

Westphal, B. G.; Bockholt, H.; Günther, T.; Haselrieder, W. & Kwade, A. (2015), "Influence of Convective Drying Parameters on Electrode Performance and Physical Electrode Properties", *ECS Transactions*, 64(22), S. 57–68, DOI: 10.1149/06422.0057ecst.

(Wi & Park et al. 2020)

Wi, Y. B.; Park, S. Y. & Park, D. H. (2020), "Apparatus and method for cutting electrode sheet", amerikanische Patentanmeldung US20200139569A1, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/US20200139569A1/en>, zuletzt abgerufen 2021-06-06.

(Wöhrle 2013)

Wöhrle, T. (2013), "Lithium-Ionen-Zelle" in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Hrsg. R. Korthauer, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 107–117; DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2_9.

(Yang & An et al. 2018)

Jang, Y. J.; An, K. J. & Sul, D. H. (2018), "Electrode assembly manufacturing method including separator cutting process", amerikanisches Patent US10069169B2, erhältlich über: <https://patents.google.com/patent/US10069169B2/en>, zuletzt abgerufen 2021-09-15.

(Yim & Choi et al. 2014)

Yim, T.; Choi, S. J.; Jo, Y. N.; Kim, T.-H.; Kim, K. J.; Jeong, G. & Kim, Y.-J. (2014), "Effect of binder properties on electrochemical performance for silicon-graphite anode: Method and application of binder screening", *Electrochimica Acta*, 136, S. 112–130, DOI: 10.1016/j.electacta.2014.05.062.

(Zhang & Sahraei et al. 2016)

Zhang, X.; Sahraei, E. & Wang, K. (2016), "Deformation and failure characteristics of four types of lithium-ion battery separators", *Journal of Power Sources*, 327, S. 693–701, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.078.

(Zhang 2006)

Zhang, S. S. (2006), "A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries", *Journal of Power Sources*, 164(1), S. 351–364, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.10.065.

(Zheng & Tan et al. 2012)

Zheng, H.; Tan, L.; Liu, G.; Song, X. & Battaglia, V. S. (2012), "Calendering effects on the physical and electrochemical properties of Li[Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}]O₂ cathode", *Journal of Power Sources*, 208, S. 52–57, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.001.

(Zheng & Li 2016)

Zheng, J. & Li, T. (2016), "Failure mechanics of a wrinkling thin film anode on a substrate under cyclic charging and discharging", *Extreme Mechanics Letters*, 8, S. 273–282, DOI: 10.1016/j.eml.2016.03.006.

(Zhu & Gastol 2021)

Zhu, P.; Gastol, D.; Marshall, J.; Sommerville, R.; Goodship, V. & Kendrick, E. (2021), "A review of current collectors for lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, 485, S. 1–21, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.229321.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2-1: Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen Zelle (in Anlehnung an (Goodenough & Abruna et al. 2007, S. 11; Leuthner 2013, S. 15)) | 4 |
| Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Kathoden- (links) und Anodenblattes (Mitte) sowie weiterer qualitätsrelevanter Merkmale (rechts) | 7 |
| Abbildung 2-3: Materialsystem-unabhängige Optimierungsansätze von Elektroden | 8 |
| Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung der drei Zellbauformen Rund-Zelle, Prismatische-Zelle und Pouch-Zelle (in Anlehnung an (Johnson Matthey 2015, S. 6–7)) | 9 |
| Abbildung 2-5: Exemplarischer Aufbau einer Pouch-Zelle | 10 |
| Abbildung 2-6: Exemplarische Darstellung der zur Herstellung eines Zellverbundes aus Einzelblattelektroden notwendigen Anlagentechnik | 12 |
| Abbildung 2-7: Vorteile eines Stapels gegenüber einem Wickel | 14 |
| Abbildung 2-8: Kapselung von Elektroden und Zellstapeln | 15 |
| Abbildung 2-9: Zusammenhang von Zellvolumen und Kapazität (vgl. Anhang A) | 16 |
| Abbildung 2-10: Abmessungen von 243 Zellen (vgl. Anhang A) | 17 |
| Abbildung 2-11: Korrelationsanalyse von Pouch- und prismatischen Zellen | 18 |
| Abbildung 2-12: Prozessschritte zur Herstellung einer Pouch-Zelle | 20 |
| Abbildung 2-13: Exemplarische Prozessführung und Herausforderungen beim Beschichten und Trocknen (in Anlehnung an (Diehm & Weinmann et al. 2019, S. 2)) | 26 |
| Abbildung 2-14: Zusammenhang zwischen Beschichtungsbreite und -geschwindigkeit sowie Trockenbeschichtungsdicke und Beschichtungsgeschwindigkeit | 27 |
| Abbildung 2-15: Exemplarische Darstellung der Prozessführung beim Kalandrieren und etwaig auftretende Effekte | 29 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 2-16: Zusammenhang zwischen Verarbeitungsbreite und -geschwindigkeit sowie Dickengenaugigkeit beim Kalandrieren | 29 |
| Abbildung 2-17: Exemplarische Darstellung der Prozessführung beim Längsschneiden und etwaig auftretende Effekte | 31 |
| Abbildung 2-18: Zusammenhang zwischen Verarbeitungsbreite und -geschwindigkeit sowie Schneidgenauigkeit beim Längsschneiden | 32 |
| Abbildung 2-19: Kumulierte Auswertung des Durchsatzes ausgewählter Prozessschritte im diskontinuierlichen Prozessteil | 33 |
| Abbildung 2-20: Schematische Darstellung der Vereinzelung mittels Stanzwerkzeug sowie auftretender Herausforderungen (in Anlehnung an (Ryu & Kwon et al. 2018; Ōsawa & Yūichirō et al. 2013)) | 36 |
| Abbildung 2-21: Exemplarische Darstellung einer Vereinzelungsmaschine | 37 |
| Abbildung 2-22: Max. Verarbeitungsbreite und -geschwindigkeiten von Vereinzelungsmaschinen | 38 |
| Abbildung 2-23: Exemplarische Darstellung eines Werkzeugs zum Notching (links) und zum Vereinzeln (rechts) | 40 |
| Abbildung 2-24: Exemplarische Darstellung eines Durchleuchtetisches zur optischen Qualitätskontrolle | 41 |
| Abbildung 2-25: Exemplarische Darstellung eines nicht verstellbaren (links) und eines verstellbaren Magazins (rechts) (in Anlehnung an (Kim & Noh et al. 2020)) | 42 |
| Abbildung 2-26: Übersicht über die Genauigkeitsangaben der Hersteller | 44 |
| Abbildung 2-27: Exemplarische Darstellung einer Stapelmaschine | 46 |
| Abbildung 2-28: Zusammenhang zwischen Verarbeitungsgeschwindigkeit und dem Durchsatz bzw. der Prozessqualität von Stapelbildungsmaschinen | 47 |
| Abbildung 2-29: Exemplarische Darstellung verwendeter Greifer-Typen in Stapelmaschinen | 50 |
| Abbildung 2-30: Exemplarische Darstellung eingesetzter Aktoren | 51 |
| Abbildung 2-31: Exemplarische Darstellung eingesetzter Ausrichtsysteme | 52 |
| Abbildung 2-32: Exemplarische Darstellung gängiger Stapelstationen | 53 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 2-33: Bearbeitungsspektrum von Vereinzelungsanlagen mit mechanischer Stanze über dem Zellportfolio | 54 |
| Abbildung 2-34: Bearbeitungsspektrum von Stapelbildungsanlagen über dem Zellportfolio | 55 |
| Abbildung 3-1: Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung (in Anlehnung an (VDI 1993)) | 60 |
| Abbildung 4-1: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 4 (Teil 1) | 62 |
| Abbildung 4-2: Funktionsplan einer Vereinzelungs- und Stapelmaschine (Z-Faltung) mit gerätetechnischer Zusammenfassung (Symbolik: VDI 1990) | 63 |
| Abbildung 4-3: Regelgenauigkeiten von Drehrahmensystemen (vgl. Anhang B) | 65 |
| Abbildung 4-4: Exemplarische Darstellung der Bewegungsphasen des Werkzeugs | 66 |
| Abbildung 4-5: Genauigkeiten von Kamera- und Kreuztischsystemen (vgl. Anhang C und D) | 67 |
| Abbildung 4-6: Leistungsdaten und Wiederholgenauigkeiten von Achstypen (vgl. Anhang E) | 68 |
| Abbildung 4-7: Exemplarische Darstellung seriell gekoppelter Linearachsen zur Handhabung von Elektrodeneinzelblättern in Stapelmaschinen | 69 |
| Abbildung 4-8: Exemplarische Darstellung der Lineareinheit zur Bewegung der Stapelstation in Stapelmaschinen | 70 |
| Abbildung 4-9: Zusammenhang zwischen vorgehaltenem Bearbeitungsspektrum und Stapelgeschwindigkeit (für „single-location stacking“) | 70 |
| Abbildung 4-10: Zusammenhang von Abmessung und Kapazität (vgl. Anhang A) | 73 |
| Abbildung 4-11: Formatflexibilität einer Vereinzelungseinheit zum Ablängen der Materialbahn nach dem Notching | 75 |
| Abbildung 4-12: Formatflexibilität eines verstellbaren Magazins zum Transport geschnittener Einzelelektrodenblätter | 76 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 4-13: Formatflexibilität unterschiedlicher Greifer-Typen zur Handhabung von Elektrodenblättern | 76 |
| Abbildung 4-14: Formatflexibilität mechanischer und optischer Ausrichtstationen zur Positionierung und Orientierung von Elektrodenblättern | 78 |
| Abbildung 4-15: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 4 (Teil 2) | 79 |
| Abbildung 4-16: Prüfablauf beim Verfahren (in Anlehnung an (DIN 2003a, S. 6)) | 80 |
| Abbildung 4-17: Biegesteifigkeit in Abhängigkeit von Material und Kalandriergrad | 82 |
| Abbildung 4-18: Vorgehensweise zur Bestimmung der Materialeigenschaften von Aktivmaterialschichten | 84 |
| Abbildung 4-19: EDX-Analyse zur Validierung einer homogenen Binderverteilung in der Probe für einen Binderanteil von 2,85 % bei der Verwendung von C65 | 86 |
| Abbildung 4-20: Einfluss der Variation von Binderanteil und Leitrußstruktur auf die Zugfestigkeit (in Anlehnung an (A_Hahn 2020; A_Frech 2020)) | 88 |
| Abbildung 4-21: Einfluss von Binderanteil und Leitrußstruktur auf die Bruchdehnung (in Anlehnung an (A_Frech 2020)) | 89 |
| Abbildung 4-22: Max. Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abhängigkeit der Verdichtung und Leitrußstruktur (unkalandrierte Werte in Anlehnung an (A_Hahn 2020)) | 91 |
| Abbildung 4-23: Farbige Abweichungsdarstellung in Bildebene (links) und Druckverteilung (rechts) einer kalandrierten Elektrodenbahn in der Materialführung | 93 |
| Abbildung 4-24: Farbige Abweichungsdarstellung in Bildebene (links) und Druckverteilung (rechts) einer längsgeschnittenen Elektrodenbahn in der Materialführung | 94 |
| Abbildung 4-25: Versuchsaufbau zur Analyse der Effekte bei der Vereinzelung | 96 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 4-26: Einzelblattabmessungen in Abhängigkeit des Bahnzuges und Materials (in Anlehnung an (A_Lin 2019)) | 97 |
| Abbildung 4-27: Blattlängenschwankungen (links) und Blattbreitenschwankungen (rechts) in Abhängigkeit der Bahnzugkraft und des Materials | 99 |
| Abbildung 4-28: Zustand der Kathodenbahn nach verschiedenen Bearbeitungsschritten der Zellproduktion (Abweichungsdarstellung in Bildebene) | 101 |
| Abbildung 4-29: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Handhabungseinflüssen | 102 |
| Abbildung 4-30: Untersuchung der max. Haltekraft einer Anodenbahn bei drei Differenzdrücken und Greifer-Anstellwinkeln (in Anlehnung an (A_Karl 2018)) | 104 |
| Abbildung 4-31: Max. Haltekraft verschiedener Materialien bei unterschiedlichen Lochdurchmessern und 400 mbar Differenzdruck (in Anlehnung an (A_Karl 2018)) | 106 |
| Abbildung 4-32: Illustration möglicher geometrischer Defekte eines stark kalandrierten Elektrodenblattes | 107 |
| Abbildung 4-33: Kontaktausprägung beim Ansaugen des Kathodenblattes mittels Niederdruckflächensauger (vollflächig); Abweichungsdarstellung in Bildebene | 109 |
| Abbildung 4-34: Längendifferenz zwischen projizierter und realer Länge eines vollflächig aufliegenden kalandrierten Kathodeneinzelblattes | 111 |
| Abbildung 4-35: Positioniergenauigkeiten in Bahnlängs- und Querrichtung | 112 |
| Abbildung 4-36: Abweichungsdarstellung einer Kathode im nicht fixierten (links), niedergehaltenen (Mitte) sowie niedergehaltenen und geklemmten (rechts) Zustand | 114 |
| Abbildung 4-37: High-Speed-Kamera Aufnahme des Klemmvorgangs | 115 |
| Abbildung 4-38: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 4 (Teil 3) | 117 |
| Abbildung 4-39: Ungenauigkeiten in der Vereinzelung und Stapelbildung | 122 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4-40: Trommelförmiger Greifer (in Anlehnung an (Götz 1991, S. 160) und Separator-Vereinzelung (in Anlehnung an (Shirakawa & Yokota et al. (2005, S. 8)) | 123 |
| Abbildung 4-41: Bewertung der Anwendungsbeispiele in Götz (1991) und Shirakawa & Yokota et al. (2005) im Hinblick auf die formulierten Prämissen | 124 |
| Abbildung 4-42: Konzept des flexiblen Vereinzelungs- und Stapelbildungsmoduls „Coil2Stack“ im Kontext des Gesamtprozessablaufs „Exinos“ | 125 |
| Abbildung 5-1: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 5 (Teil 1) | 127 |
| Abbildung 5-2: Abschätzung max. möglicher Bahnzugkräfte in Abhängigkeit des Differenzdrucks und Materials | 129 |
| Abbildung 5-3: Materialspeicher in entleertem (oben links) und gefülltem (unten links) Zustand und Abschätzung des Arbeitsbereichs (rechts) | 130 |
| Abbildung 5-4: Tänzer im nicht ausgelenktem (oben links) und ausgelenktem (unten rechts) Zustand und Abschätzung des Arbeitsbereichs (rechts) | 131 |
| Abbildung 5-5: Abschätzung der max. Durchbiegung einer einseitig gelagerten Achse in Abhängigkeit des Werkstoffs und der wirkenden Bahnzugkraft | 133 |
| Abbildung 5-6: Drehrahmen mit kurzer (links) und langer (rechts) Ein-/Auslauflänge | 136 |
| Abbildung 5-7: Messung des Differenzdrucks in Abhängigkeit der Position und etwaiger Nebenluft am Handhabungselement | 139 |
| Abbildung 5-8: Segmente und Radien des Greifers (Handhabungselement) | 140 |
| Abbildung 5-9: Technologische Kenngrößen des Kreismesserscherschneidens (Eigene Darstellung nach (Feiler 1970, S. 138)) | 141 |
| Abbildung 5-10: Aufbau der Schneideinheit am Handhabungselement (links) sowie Zusammenhang zwischen Überdeckung, Kreismesser-Durchmesser und Voreilung | 143 |
| Abbildung 5-11: Zusammenhang zwischen Eingriffswinkel, Rundmesser-Durchmesser und Überdeckung | 144 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 5-12: Darstellung der elektrisch-pneumatischen Lösung (links) sowie Stapelstation in der obersten (Mitte) und untersten (rechts) Position | 147 |
| Abbildung 5-13: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 5 (Teil 2) | 148 |
| Abbildung 5-14: Bahnführung und Einzelblattablage im Anlagenmodul | 152 |
| Abbildung 5-15: Punkt bzw. linienförmige Kontaktherstellung bei der Materialaufnahme | 153 |
| Abbildung 5-16: Zusammenhang zwischen dem Durchhang der Elektrodenbahn und der wirkenden Bahnzugkraft | 155 |
| Abbildung 5-17: Ablauf des Handhabungs- und Schneidvorgangs in der kontinuierlichen Verfahrensführung | 156 |
| Abbildung 5-18: Elektrodenblattübergabe durch Ablegen (links) und Abrollen (rechts) auf den Stapeltisch | 157 |
| Abbildung 5-19: Verstellung der Handhabungselementposition zur Erzeugung unterschiedlicher Elektrodenblattlängen | 159 |
| Abbildung 5-20: Bauteil- und bauraumbedingte Restriktionen des Anlagenmoduls | 160 |
| Abbildung 5-21: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 5 (Teil 3) | 161 |
| Abbildung 5-22: Gesamtaufbau (Coil2Stack) zur kontinuierlichen und formatflexiblen Vereinzelung und Stapelbildung | 162 |
| Abbildung 5-23: Antriebsseitige Umsetzung der Ablagebewegung (links) und geometriebedingte Umfangsgeschwindigkeitsdifferenz (rechts) | 164 |
| Abbildung 5-24: Positions- und Geschwindigkeitsdaten der Antriebe bei 16 mm/s Bahnvorschub für zwei Blattlängen (in Anlehnung an (A_Schmidgruber 2020)) | 165 |
| Abbildung 5-25: Funktionsplan des Coil2Stack Anlagenmoduls (Symbolik: VDI 1990) | 167 |
| Abbildung 5-26: Realisierung des Anlagenmoduls zur formatflexiblen Stapelbildung (Bedienerseite) | 167 |
| Abbildung 5-27: Realisierung des Anlagenmoduls zur formatflexiblen Stapelbildung (Antriebsseite) | 168 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 6-1: Vorgehensweise zur Zielerreichung in Kapitel 6 | 169 |
| Abbildung 6-2: Untersuchungen zur Identifikation optimaler Prozessparameter | 170 |
| Abbildung 6-3: Kraft-Dehnungs-Diagramm für Elektroden (Anode) und Kupferfolien (Folie N = 15, Folie + Beschichtung N = 6) | 171 |
| Abbildung 6-4: 3D-Scan der Elektrodenbahn bei der Kontaktherstellung unter verschiedenen Bahnzugkräften, Abweichungsdarstellung in Bildebene | 172 |
| Abbildung 6-5: Biegesteifigkeit von Papier und unterschiedlichen Elektroden | 174 |
| Abbildung 6-6: 3D-Scan der Elektrodenbahn auf dem Handhabungselement, Abweichungsdarstellung in Richtung der Bahnzugkraft | 176 |
| Abbildung 6-7: Gemittelte Bewegung der Materialbahn auf dem Handhabungselement in Bahnzugrichtung | 177 |
| Abbildung 6-8: Vergleich des gemessenen und berechneten Bahndurchhangs in der freien Bahnlänge | 178 |
| Abbildung 6-9: Berechnung der Ersatzkraft für verschiedene Bahnbreiten | 178 |
| Abbildung 6-10: Kumulative Längenänderung in Abhängigkeit des Elektrodenformates und der Bahnzugkraft | 179 |
| Abbildung 7-1: Vorgehensweise zur Erreichung der Zielstellung in Kapitel 7 | 180 |
| Abbildung 7-2: 3D-Messung des im SLM-Druckverfahren hergestellten Handhabungselementes | 181 |
| Abbildung 7-3: Messung der Planlaufgenauigkeit | 182 |
| Abbildung 7-4: Abbildung zu den Messpositionen zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit der Elektrode auf der Stapelstation | 183 |
| Abbildung 7-5: Positioniergenauigkeit der Elektrodenblätter auf der Stapelstation (links), Wahrscheinlichkeitsdiagramm der Abweichung (rechts) | 183 |
| Abbildung 7-6: Maßgenauigkeit der geschnittenen Elektrodenblätter in Bahnlaufrichtung und Häufigkeitsverteilung der Maßabweichung | 185 |
| Abbildung 7-7: Zusammenhang zwischen der Maßabweichung der Elektrodenblätter und der korrespondierenden Ablageposition | 186 |

Abbildung 7-8: Schnittqualität der vereinzelt Elektrodenblätter über die
Bahnbreite von 125 mm 187

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 2-1: Auszug berechneter Anlagenanzahl über die Prozesskette | 21 |
| Tabelle 4-1: Anzahl und Parameter durchgeführter Biegesteifigkeitsprüfungen | 81 |
| Tabelle 4-2: Zusammensetzung der Anoden-Aktivmaterialsichten mit unterschiedlichen Binderanteilen und Leitruß-Typen | 85 |
| Tabelle 4-3: Zusammensetzung der Kathoden-Aktivmaterialsichten mit unterschiedlichen Binderanteilen und Leitruß-Typen | 85 |
| Tabelle 4-4: Übersicht über die Anzahl durchgeführter Zugversuche | 87 |
| Tabelle 4-5: Übersicht über berechnete und gemessene Dichten | 91 |
| Tabelle 4-6: Zusammenfassung der Ergebnisse für unterschiedliche Materialien und Anstellwinkel bei 400 mbar Differenzdruck (in Anlehnung an (A_Karl 2018)) | 104 |
| Tabelle 4-7: Übersicht über die Versuchskonfiguration (nach (A_Karl 2018)) | 105 |
| Tabelle 4-8: Zusammenfassung der Ergebnisse für unterschiedliche Materialien und Lochdurchmesser bei 400 mbar Differenzdruck (in Anlehnung an (A_Karl 2018)) | 106 |
| Tabelle 4-9: Kontinuitäts- und produktivitätsbestimmende Prämissen | 117 |
| Tabelle 4-10: Flexibilitätsbestimmende Prämissen | 119 |
| Tabelle 4-11: Qualitätsbestimmende Prämissen | 120 |
| Tabelle 5-1: Relevante Prämissen zur Auslegung von Materialspeicher und Tänzer | 128 |
| Tabelle 5-2: Relevante Prämissen zur Auslegung des Drehrahmens | 134 |
| Tabelle 5-3: Relevante Prämissen zur Auslegung des Handhabungselements | 137 |
| Tabelle 5-4: Relevante Prämissen zur Auslegung der Stapelstation | 146 |
| Tabelle 5-5: Relevante Prämissen zur Umsetzung einer kontinuierlichen und funktionsintegrierten Prozessführung | 148 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 5-6: Relevante Prämissen zur Umsetzung einer flexiblen Prozessführung | 157 |
| Tabelle 5-7: Relevante Prämissen zur Auslegung des Gesamtaufbaus | 161 |
| Tabelle 5-8: Relevante Prämissen zur Gestaltung des Verfahrensablaufs | 163 |
| Tabelle 6-1: Verhältnis zwischen eingestellter und tatsächlich wirkender Bahnzugkraft | 170 |
| Tabelle 6-2: Einfluss der elastischen Dehnung auf die Elektrodenblattmaßhaltigkeit | 171 |
| Tabelle 6-3: Einfluss des Bahndurchhangs auf die Elektrodenmaßhaltigkeit | 174 |
| Tabelle 6-4: Nachgiebigkeit der runden Grundplatte | 175 |

Anhang

Anhang A: Zellportfolio

| Hersteller | Bezeichnung | Kapazität [Ah] | Volumen [l] | | | Typ |
|----------------------|-------------|----------------|-------------|-----------|------------|--------|
| | | | Weite [mm] | Höhe [mm] | Tiefe [mm] | |
| LG Chem | E63 | 65,6 | 325 | 125 | 11,5 | Pouch |
| CTS Power Technology | N9059156 | 10 | 190 | 65 | 8,8 | Pouch |
| CTS Power Technology | N9590150 | 10 | 155 | 118 | 6,6 | Pouch |
| CTS Power Technology | N66118155 | 10 | 270 | 68 | 6,8 | Pouch |
| CTS Power Technology | N75160232 | 20 | 232 | 160 | 7,5 | Pouch |
| CTS Power Technology | N82130208 | 20 | 180 | 160 | 6 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 20 | 208 | 130 | 8,2 | Pouch |
| CTS Power Technology | N10181241 | 26 | 241 | 181 | 10 | Pouch |
| CTS Power Technology | N11181241 | 32 | 241 | 181 | 11 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 32 | 241 | 156 | 8 | Pouch |
| CTS Power Technology | N10160227 | 40 | 227 | 160 | 10 | Pouch |
| CTS Power Technology | N10180260 | 40 | 260 | 186 | 10 | Pouch |
| CTS Power Technology | N85188236 | 40 | 236 | 180 | 8,5 | Pouch |
| CTS Power Technology | F9590150 | 10 | 150 | 90 | 9,5 | Pouch |
| CTS Power Technology | F8068270 | 10 | 270 | 68 | 8 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 20 | 240 | 142 | 8,3 | Pouch |
| CTS Power Technology | F65160227 | 20 | 227 | 160 | 6,5 | Pouch |
| CTS Power Technology | F92126236 | 20 | 236 | 126 | 9,2 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 20 | 170 | 150 | 8,3 | Pouch |
| CTS Power Technology | F85137232 | 25 | 232 | 137 | 8,5 | Pouch |
| CTS Power Technology | F90133200 | 25 | 200 | 133 | 9 | Pouch |
| CTS Power Technology | F90160222 | 30 | 222 | 160 | 9 | Pouch |
| CTS Power Technology | F92170240 | 30 | 240 | 170 | 9,2 | Pouch |
| CTS Power Technology | F10160222 | 38 | 222 | 160 | 10 | Pouch |
| CTS Power Technology | F85188236 | 40 | 236 | 188 | 8,5 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 50 | 203 | 173 | 32 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 50 | 173 | 128 | 32 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 60 | 165 | 150 | 60 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 80 | 200 | 150 | 60 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 100 | 215 | 150 | 60 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 60 | 165 | 150 | 60 | Prism. |
| CTS Power Technology | | 80 | 188 | 150 | 60 | Prism. |
| CTS Power Technology | | 100 | 215 | 150 | 60 | Prism. |
| CTS Power Technology | | 125 | 250 | 150 | 60 | Prism. |
| CTS Power Technology | | 150 | 281 | 150 | 60 | Prism. |

| | | | | | | |
|------------------------|-----------------|------|-----|-----|------|-------|
| CTS Power Technology | | 22 | 190 | 90 | 11 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 16 | 170 | 74 | 11 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 10 | 155 | 65 | 11 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 5,2 | 135 | 50 | 9 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 5,2 | 128 | 43 | 10 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 5 | 125 | 46 | 10 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 4 | 128 | 43 | 8 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 4 | 128 | 43 | 8 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 2,2 | 96 | 34 | 9,5 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 10 | 140 | 82 | 10 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 8 | 150 | 90 | 9 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 6 | 142 | 70 | 9,5 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 5 | 142 | 70 | 7,9 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 4 | 127 | 50 | 9,8 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 3,3 | 127 | 50 | 8,2 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 2,5 | 128 | 43 | 7,4 | Pouch |
| CTS Power Technology | | 2,4 | 128 | 43 | 7 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB 70115145/12 | 12 | 145 | 115 | 7 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB704684 | 3,3 | 84 | 46 | 7 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB655060 | 2,28 | 60 | 50 | 6,5 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB655060 | 2 | 60 | 50 | 6 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB58253172V3 | 25 | 253 | 172 | 5,8 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB58253172 | 22 | 253 | 172 | 5,8 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB90140220 | 20 | 217 | 140 | 9 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB90210260 | 40 | 260 | 210 | 9 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB58253172 | 17,5 | 253 | 172 | 5,8 | Pouch |
| ENERTECH international | SPB59253172 | 16 | 253 | 172 | 5,9 | Pouch |
| Kokam | SLPB065070180 | 11,6 | 185 | 84 | 6,6 | Pouch |
| Kokam | SLPB080085270 | 26 | 275 | 99 | 7,9 | Pouch |
| Kokam | SLPB60216216 | 25 | 227 | 226 | 6,3 | Pouch |
| Kokam | SLPB72216216 | 31 | 227 | 226 | 7,5 | Pouch |
| Kokam | SLPB90216216 | 40 | 227 | 226 | 9,3 | Pouch |
| Kokam | SLPB120216216 | 53 | 227 | 226 | 12 | Pouch |
| Kokam | SLPB120216216G2 | 70 | 227 | 226 | 12,3 | Pouch |
| Kokam | SLPB120255255 | 75 | 268 | 265 | 11,8 | Pouch |
| Kokam | SLPB130255255G1 | 100 | 268 | 265 | 13,1 | Pouch |
| Kokam | SLPB120460330 | 150 | 462 | 327 | 10,5 | Pouch |
| Kokam | SLPB140460330 | 200 | 462 | 327 | 13,6 | Pouch |
| Kokam | SLPB160460330 | 240 | 462 | 327 | 15,8 | Pouch |
| Kokam | SLPB98188216P | 30 | 224 | 199 | 9,4 | Pouch |
| Kokam | SLPB130255255P | 75 | 268 | 265 | 13,7 | Pouch |

| | | | | | | |
|--------------------------|------------------|-----|-----|-----|------|--------|
| Kokam | SLPB100216216H | 40 | 227 | 226 | 10,3 | Pouch |
| Kokam | SLPB125255255H | 74 | 268 | 265 | 13 | Pouch |
| Kokam | SLPB160460330H | 200 | 492 | 327 | 14,8 | Pouch |
| Kokam | SLPB120216216HR2 | 46 | 227 | 226 | 12,2 | Pouch |
| BESTGO Power | BCPNE20T | 20 | 225 | 68 | 13 | Pouch |
| BESTGO Power | BCPNE32G | 32 | 242 | 155 | 8 | Pouch |
| BESTGO Power | BCPNE48M | 48 | 310 | 100 | 12 | Pouch |
| BESTGO Power | BCPFE30E | 30 | 242 | 155 | 8 | Pouch |
| BESTGO Power | BCPFE20R | 20 | 240 | 142 | 9 | Pouch |
| CALB | CA40 | 40 | 180 | 116 | 46 | Prism. |
| CALB | CA60FI | 60 | 240 | 115 | 41 | Prism. |
| CALB | CA100 | 100 | 213 | 142 | 67 | Prism. |
| CALB | CA180FI | 180 | 279 | 180 | 71 | Prism. |
| CALB | CA400 | 400 | 450 | 281 | 71 | Prism. |
| CALB | CAM72 | 72 | 216 | 135 | 29 | Prism. |
| CALB | CAS20 | 20 | 230 | 144 | 6,9 | Prism. |
| CALB | SE60 | 60 | 215 | 115 | 61 | Prism. |
| CALB | CAM80 | 80 | 173 | 133 | 48 | Prism. |
| CALB | SE180 | 180 | 279 | 182 | 71 | Prism. |
| CALB | SE200 | 200 | 279 | 182 | 71 | Prism. |
| Toshiba | SCiB High Energy | 23 | 116 | 106 | 22 | Prism. |
| Toshiba | SCiB High Energy | 20 | 116 | 106 | 22 | Prism. |
| Toshiba | SCiB High Power | 10 | 116 | 106 | 22 | Prism. |
| Toshiba | SCiB High Power | 2,9 | 97 | 63 | 14 | Prism. |
| Samsung | SDI 94 | 94 | 173 | 125 | 45 | Prism. |
| Hangzhou Dongjian Energy | F906588 | 3 | 88 | 65 | 9 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | F1006588 | 3,5 | 88 | 65 | 10 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | F7268130 | 5 | 130 | 68 | 7,2 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | F9075130 | 5,5 | 130 | 75 | 9 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | F13075130 | 7,5 | 130 | 75 | 13 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | F11075200 | 10 | 200 | 75 | 11 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | F95105160d | 10 | 160 | 110 | 9,5 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | F9085215d | 10 | 215 | 85 | 9 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | 6860100 | 4 | 100 | 60 | 6,8 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | 7650100 | 4,2 | 100 | 60 | 7,5 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | 8060100 | 4,5 | 100 | 60 | 8 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | 8560130 | 5 | 100 | 60 | 8,5 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | 7268130 | 7,2 | 130 | 68 | 7,2 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | 8568130 | 8 | 130 | 68 | 8,5 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | 1168130 | 10 | 130 | 68 | 11 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | | 10 | 130 | 115 | 6,8 | Pouch |

| | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|------|-----|-------|------|--------|
| Hangzhou Dongjian Energy | | 10 | 130 | 115 | 8,5 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | 7568130d | 6,5 | 130 | 68 | 7,5 | Pouch |
| Hangzhou Dongjian Energy | 9284130d | 10 | 130 | 84 | 9,2 | Pouch |
| Shenzen Delong Energy Tech | | 25 | 210 | 156 | 9,5 | Pouch |
| Shenzen Delong Energy Tech | | 200 | 205 | 173 | 54 | Prism. |
| Shenzen A&S Power Tech | | 25 | 208 | 155 | 9,5 | Pouch |
| Shenzen Youngpower Tech | | 26 | 150 | 140 | 14 | Pouch |
| Howell Energy | | 20 | 227 | 160 | 7,25 | Pouch |
| Shenzen Delong Energy Tech | | 10 | 130 | 68 | 12 | Pouch |
| Shenzen A&S Power Tech | | 10 | 132 | 65 | 13 | Pouch |
| Shenzen A&S Power Tech | | 100 | 200 | 130 | 36 | Prism. |
| Shenzen A&S Power Tech | AS30135185 | 50 | 185 | 135 | 30 | Prism. |
| Shenzen A&S Power Tech | | 100 | 218 | 142 | 67 | Prism. |
| Howell Energy | HW-F25 | 25 | 140 | 100 | 22 | Prism. |
| Howell Energy | HW-F80A | 80 | 173 | 132 | 48 | Prism. |
| Howell Energy | HW-F80B | 80 | 206 | 135 | 27 | Prism. |
| Howell Energy | HW-F100A | 100 | 173 | 132 | 48 | Prism. |
| Howell Energy | HW-F100B | 100 | 216 | 135 | 34 | Prism. |
| Young Power Technology | A123 | 20 | 227 | 161 | 7,2 | Prism. |
| Young Power Technology | | 40 | 180 | 100 | 30 | Prism. |
| Young Power Technology | LF50 | 50 | 180 | 135 | 30 | Prism. |
| Young Power Technology | LF56 | 57,5 | 180 | 135 | 29,5 | Prism. |
| Young Power Technology | LF80 | 80 | 180 | 130 | 36,7 | Prism. |
| Young Power Technology | LF75 | 75 | 195 | 130 | 36 | Prism. |
| Young Power Technology | LF90 | 90 | 195 | 130 | 36 | Prism. |
| Young Power Technology | LF105 | 105 | 195 | 130,3 | 36,7 | Prism. |
| Young Power Technology | LF280 | 280 | 200 | 173,9 | 72 | Prism. |
| Young Power Technology | | 120 | 173 | 165 | 49 | Prism. |
| Young Power Technology | | 150 | 200 | 168 | 46 | Prism. |
| Young Power Technology | | 150 | 174 | 174 | 48,5 | Prism. |
| General Electronics Technology | GEB100120140 | 20 | 140 | 120 | 10,8 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 38 | 236 | 188 | 7,5 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 31 | 218 | 180 | 10 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 30 | 260 | 173 | 9,3 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 35 | 260 | 173 | 11 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 20 | 240 | 170 | 7 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 30 | 240 | 170 | 10 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 50 | 316 | 190 | 11 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 40 | 250 | 210 | 8,8 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 5,5 | 128 | 68 | 7,2 | Pouch |
| Henan Lithium Power Source | | 7,5 | 128 | 68 | 9,3 | Pouch |

| | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|------|-------|-------|------|--------|
| Henan Lithium Power Source | | 10 | 256 | 68 | 7,7 | Pouch |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 39 | 342 | 109 | 8 | Pouch |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 39 | 307 | 100 | 11 | Pouch |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 36 | 227 | 162 | 8,3 | Pouch |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 51 | 227 | 162 | 8,3 | Pouch |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 42 | 342 | 109 | 8,4 | Pouch |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 34 | 342 | 109 | 7,8 | Pouch |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 30 | 227 | 162 | 8,3 | Pouch |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 105 | 201 | 131 | 37 | Prism. |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 50 | 148,2 | 102 | 26,8 | Prism. |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 102 | 200 | 130 | 37 | Prism. |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 158 | 200 | 173 | 54 | Prism. |
| Shenzen Starmax Energy Tech | | 130 | 173 | 166 | 48 | Prism. |
| Kokam | SLPB135255255PR2 | 70 | 268 | 265 | 13,5 | Pouch |
| EEMB | LP903395F | 2 | 96 | 33,5 | 9,3 | Pouch |
| EEMB | LP584374F | 1,3 | 75 | 43,5 | 6,1 | Pouch |
| EEMB | LP904374F | 2,1 | 75 | 43,5 | 9,3 | Pouch |
| EEMB | LP7851119F | 3,5 | 120 | 51,5 | 8,1 | Pouch |
| EEMB | LP1167220F | 11 | 224 | 67,5 | 11,3 | Pouch |
| EEMB | LP7568130F | 5 | 131 | 68,5 | 7,8 | Pouch |
| EEMB | LP9590120F | 8,5 | 121 | 90,5 | 9,8 | Pouch |
| EEMB | LP8867220F | 10 | 224 | 67,5 | 9,3 | Pouch |
| EEMB | LP60100100F | 4,5 | 101 | 100,5 | 6,3 | Pouch |
| EEMB | LP90100160F | 10 | 166 | 101 | 9,5 | Pouch |
| EEMB | LP75103122F | 7 | 123 | 103,5 | 7,8 | Pouch |
| EEMB | LP13120215F | 25 | 225 | 122 | 14 | Pouch |
| EEMB | LP70103122 | 8,7 | 123 | 103,5 | 7,3 | Pouch |
| EEMB | LP38103122 | 5,2 | 123 | 103,5 | 4,1 | Pouch |
| EEMB | LP61100100 | 6,8 | 101 | 100,5 | 6,4 | Pouch |
| EEMB | LP55100100LC | 5,6 | 101 | 100,5 | 5,8 | Pouch |
| EEMB | LP9551119 | 6,5 | 120 | 51,5 | 9,8 | Pouch |
| EEMB | LP9051109 | 5,5 | 110 | 51,5 | 9,3 | Pouch |
| A123 Systems | AHP14M1Ultra-A | 14 | 227 | 160 | 7,25 | Prism. |
| A123 Systems | AHP14M1Ultra-A | 20 | 227 | 160 | 7,25 | Pouch |
| A123 Systems | A123 26Ah NMC | 26 | 227 | 161 | 7,5 | Pouch |
| A123 Systems | 300743-001 | 20 | 170 | 150 | 14,2 | Pouch |
| Envision AESEC | | 56,3 | 261 | 216 | 7,91 | Pouch |
| Panasonic | UF103450P | 2 | 48,8 | 33,8 | 10,5 | Prism |
| Panasonic | NCA103450 | 2,35 | 48,5 | 33,8 | 10,5 | Prism |
| Panasonic | NCA793540 | 1,57 | 40,5 | 35,1 | 7,95 | Prism |
| AA Portable Power | LFP-G20 | 20 | 155 | 72 | 43 | Prism. |

| | | | | | | |
|-------------------|------------------|------|-------|------|------|--------|
| AA Portable Power | LFP-G40 | 40 | 180 | 126 | 46 | Prism. |
| AA Portable Power | LFP-G60 | 60 | 180 | 126 | 65 | Prism. |
| AA Portable Power | LFP-G100 | 100 | 236 | 140 | 62 | Prism. |
| AA Portable Power | LFP-G200Ah | 200 | 500 | 142 | 57 | Prism. |
| AA Portable Power | LFP-G200Ah-B | 200 | 290 | 238 | 66 | Prism. |
| AA Portable Power | LFP-G300Ah | 300 | 365 | 312 | 63 | Prism. |
| AA Portable Power | LFP-G400AH | 400 | 365 | 312 | 73 | Prism. |
| AA Portable Power | | 8 | 115 | 103 | 8 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-7789182-2C | 9 | 184 | 89 | 8 | Pouch |
| AA Portable Power | LMN-8790140-1C | 10 | 141 | 91 | 9,2 | Pouch |
| AA Portable Power | NCM-10059156-5C | 10 | 162 | 60 | 11 | Pouch |
| AA Portable Power | | 15 | 216 | 91 | 8 | Pouch |
| AA Portable Power | NCM-9789182-2C | 15,5 | 185 | 90 | 10 | Pouch |
| AA Portable Power | | 20 | 216 | 130 | 7 | Pouch |
| AA Portable Power | NCM-80324172E30 | 50 | 325 | 172 | 8 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-1055275-2C | 21 | 275 | 55 | 10,5 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-8570170-2C | 12,6 | 178 | 72 | 9,2 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-1290142-1.5C | 12 | 142 | 90 | 11,5 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-9059156-1C | 10 | 156 | 59 | 9 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-809797-1C | 9 | 97 | 99 | 8,2 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-7548168-1C | 6,4 | 168 | 48 | 7,5 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-7250115-2C | 5 | 117 | 50 | 7,2 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-896474-2C | 5 | 74 | 64 | 8,9 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-6767100-2C | 5 | 101,5 | 67 | 6,8 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-5467100-2C | 4,25 | 100,5 | 67 | 5,7 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-5545135-2C | 3,65 | 135 | 45 | 5,5 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-655585-2C | 3,2 | 85 | 55 | 6,5 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-674792-2C | 3,1 | 96 | 48 | 6,8 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-525084-2C | 2,8 | 86 | 50,5 | 6 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-875055-2C | 2,5 | 57 | 50,5 | 8,8 | Pouch |
| AA Portable Power | PL-544792-2C | 2,5 | 92 | 47 | 5,4 | Pouch |
| AA Portable Power | PL- 605060-2C | 2 | 69 | 50 | 6 | Pouch |
| AA Portable Power | LFP-8790160-5C | 10 | 163 | 92 | 9 | Pouch |
| AA Portable Power | LFP-87122200-2C | 15 | 202 | 123 | 9 | Pouch |
| AA Portable Power | LFP-10080230-2C | 15 | 232 | 81 | 10 | Pouch |
| AA Portable Power | LFP-100122200-2C | 20 | 201 | 123 | 11 | Pouch |
| CATL | CATL-NCM50AH | 50 | 148 | 98 | 27 | Prism. |
| CATL | | 120 | 180 | 180 | 50 | Prism. |
| AMTE | | 4,4 | 219 | 70 | 4,8 | Pouch |
| AMTE | | 20 | 252 | 97 | 6,9 | Pouch |
| AMTE | | 30 | 228 | 167 | 11,6 | Pouch |

| | | | | | | |
|-----------|-----------------|----|-----|-------|----|-------|
| Leclanché | 936901 | 34 | 286 | 178,5 | 12 | Pouch |
| Leclanché | 936A04 | 60 | 286 | 178,5 | 12 | Pouch |
| Farasis | IMP06160230P25A | 25 | 230 | 61 | 6 | Pouch |

Pouch = Pouch Zelle | **Prism.** = Prismatische Zelle

Anhang B: Drehrahmensysteme

Regelgenauigkeit von **Drehrahmensystemen mit Infrarotbreitbandsensor:**

| Hersteller | Bezeichnung | Regelgenauigkeit |
|----------------|-------------|------------------|
| Erhardt+Leimer | DRB14 | ± 0,2 mm |
| Erhardt+Leimer | DRB 23 | ± 0,2 mm |
| Erhardt+Leimer | DRB25 | ± 0,2 mm |
| DongGuan | US | ± 0,1 mm |
| Tougu Denki | LPC-83R | ± 0,1 mm |
| Tougu Denki | DS-7 | ± 0,1 mm |

Regelgenauigkeit von **Drehrahmensystemen mit Ultraschallsensor:**

| Hersteller | Bezeichnung | Regelgenauigkeit |
|----------------|-----------------|------------------|
| Erhardt+Leimer | DRB14 | ± 0,1 mm |
| Erhardt+Leimer | DRB 23 | ± 0,1 mm |
| Erhardt+Leimer | DRB25 | ± 0,1 mm |
| Erhardt+Leimer | DRS31 | ± 0,1 mm |
| Erhardt+Leimer | DRS 71 | ± 0,1 mm |
| Erhardt+Leimer | Eco Line DRS 20 | ± 0,15 mm |
| R2R-Tech | WPS 16 | ± 0,256 mm |
| R2R-Tech | WPS 48 | ± 0,256 mm |
| R2R-Tech | WPS 221 | ± 0,256 mm |
| Tougu Denki | WGS | ± 0,1 mm |
| Tougu Denki | DU-N | ± 0,1 mm |

Regelgenauigkeit von **Drehrahmensystemen mit CCD:**

| Hersteller | Bezeichnung | Regelgenauigkeit |
|--------------|-------------------|------------------|
| BST Eltromat | CPWC | ± 0,1 mm |
| DongGuan | PS-400S | ± 0,05 mm |
| DongGuan | HCCD-Kamerasensor | ± 0,02 mm |

Anhang C: KamerasystemeAuflösung von **Kamerasystemen**:

| Hersteller | Bezeichnung | Auflösung lateral | Arbeitsabstand |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Automation Technology | C5-1280-CS 14-76 | ± 29,7 µm | 210 mm |
| Automation Technology | C5-1280-CS 21-40 | ± 15,5 µm | 90 mm |
| Automation Technology | C5-1280-CS 23-29 | ± 11,5 µm | 106 mm |
| Automation Technology | C5-1280-CS 23-75 | ± 29,5 µm | 106 mm |
| Automation Technology | C5-1280-CS 25-20 | ± 7,5 µm | 72 mm |
| Automation Technology | C5-1280-CS 30-248 | ± 97 µm | 400 mm |
| Automation Technology | C5-1280-CS 35-12 | ± 4,5 µm | 31 mm |
| Automation Technology | C5-1280-CS 35-7 | ± 2,75 µm | 31 mm |
| Automation Technology | C5-2040-CS 14-160 | ± 39 µm | 197 mm |
| Automation Technology | C5-2040-CS 18-1015 | ± 248, µm | 744 mm |
| Automation Technology | C5-2040-CS 18-38-2X | ± 9,5 µm | 117 mm |
| Automation Technology | C5-2040-CS 19-640 | ± 156,5 µm | 700 mm |
| Automation Technology | C5-2040-CS 21-53 | ± 13 µm | 90 mm |
| Automation Technology | C5-2040-CS 23-100 | ± 24,5 µm | 106 mm |
| Automation Technology | C5-2040-CS 23-63 | ± 15,5 µm | 106 mm |
| Automation Technology | C5-2040-CS 30-330 | ± 80,5 µm | 400 mm |
| LMI | GOCATOR 2510-2 | ± 4 µm | 17 mm |
| LMI | GOCATOR 2512 | ± 4 µm | 17 mm |
| LMI | GOCATOR 2520-2 | ± 6,5 µm | 47,5 mm |
| LMI | GOCATOR 2522-2 | ± 6,5 µm | 17,75 mm |
| LMI | GOCATOR 2320-2-REVD | ± 7 µm | 40 mm |
| LMI | GOCATOR 2320-3R-REVD | ± 7 µm | 40 mm |

Anhang D: KreuztischeGenauigkeit von **Kreuztischen**:

| Hersteller | Bezeichnung | Positioniergenauigkeit |
|-------------------|--------------------|-------------------------------|
| Newport | ONE-XY60 | ± 0,0015 mm |
| Newport | ONE-XY60HA | ± 0,0003 mm |
| Newport | ONE-XY100 | ± 0,002 mm |
| Newport | ONE-XY100HA | ± 0,0003 mm |
| Newport | ONE-XY200 | ± 0,0025 mm |
| Newport | ONE-XY200HA | ± 0,0004 mm |
| Newport | ONE-XY300 | ± 0,003 mm |
| Newport | ONE-XY300HA | ± 0,0005 mm |

| | | |
|------------|-----------------|-------------|
| Steinmeyer | KDT180-DC | ± 0,0131 mm |
| Steinmeyer | KDT180-NM | ± 0,0083 mm |
| Steinmeyer | KDT180-PM | ± 0,0008 mm |
| Steinmeyer | KDT180-SM | ± 0,0143 mm |
| Steinmeyer | KDT235-50-DC-R | ± 0,0074 mm |
| Steinmeyer | KDT235-50-DC-L | ± 0,0023 mm |
| Steinmeyer | KDT310-100-DC-R | ± 0,018 mm |
| Steinmeyer | KDT310-100-DC-L | ± 0,0061 mm |
| Steinmeyer | KDT310-SM | ± 0,0181 mm |
| Steinmeyer | KDT600-EDLM | ± 0,0166 mm |
| Steinmeyer | KLT310-100-DC-R | ± 0,01 mm |
| Steinmeyer | KLT310-100-DC-L | ± 0,001 mm |
| Steinmeyer | KLT310-SM | ± 0,01 mm |
| Steinmeyer | KT180-50-DC-R | ± 0,0055 mm |
| Steinmeyer | KT180-50-DC-L | ± 0,0018 mm |

Anhang E: Achsen

Wiederholgenauigkeit von **Kugelgewindtrieben**:

| Hersteller | Bezeichnung | Wiederholgenauigkeit |
|--------------------|----------------------------|----------------------|
| IEF-Werner GmbH | profiline 70 | ± 0,003 mm |
| IEF-Werner GmbH | profiline 50 | ± 0,005 mm |
| Bosch Rexroth | Compactmodul CKK-200 | ± 0,005 mm |
| Bosch Rexroth | MKK-110 | ± 0,005 mm |
| Bosch Rexroth | PSK-060 | ± 0,005 mm |
| Bosch Rexroth | TKK-325-ST | ± 0,005 mm |
| Rollon | TH Serie, Precision System | ± 0,005 mm |
| Festo | ELGC-BS-KF-60-400-12P | ± 0,01 mm |
| Dreckshage/Thomson | WM60D | ± 0,01 mm |
| Festo | ELGS-BS-KF-45 | ± 0,015 mm |
| Tretter | Movitec CVP060 | ± 0,015 mm |
| Festo | EGC-80-BS-KF | ± 0,02 mm |
| Festo | EGC-HD-160-BS | ± 0,02 mm |
| Festo | ELGA-BS-KF-80 | ± 0,02 mm |
| Isel | LES 6 | ± 0,04 mm |

Wiederholgenauigkeit von **Linearmotoren**:

| Hersteller | Bezeichnung | Wiederholgenauigkeit |
|-------------------|--------------------|-----------------------------|
| Sinadrives | MLE 3 | ± 0,005 mm |
| Sinadrives | MLE 5 | ± 0,005 mm |
| Sinadrives | MLE 7 | ± 0,005 mm |
| Sinadrives | MLZ 2 | ± 0,005 mm |
| Sinadrives | MCE 3 | ± 0,005 mm |
| Sinadrives | MLE 2 | ± 0,01 mm |
| Sinadrives | MLU 3 | ± 0,01 mm |
| Steinmeyer | LA340-500-EDLM-L | ± 0,0004 mm |
| Steinmeyer | LA340-500-EDLM-L | ± 0,0004 mm |
| Steinmeyer | LA340-500-EDLM-L | ± 0,0004 mm |
| Steinmeyer | LA340-500-EDLM-L | ± 0,0004 mm |

Wiederholgenauigkeit von **Zahnriementrieben**:

| Hersteller | Bezeichnung | Wiederholgenauigkeit |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| IEF-Werner | Easy Line | ± 0,04 mm |
| Festo | ELGC-TB-KF-90 | ± 0,05 mm |
| IEF-Werner | Modul 65/15 | ± 0,05 mm |
| Bosch Rexroth | Compactmodul CKR 110 | ± 0,05 mm |
| Bosch Rexroth | MKR-110 | ± 0,05 mm |
| Bosch Rexroth | MLR-110 | ± 0,05 mm |
| Rollon | ELM 80 SP | ± 0,05 mm |
| Rollon | Uniline Serie | ± 0,05 mm |
| Rose Krieger | RK Monolinen Z80 | ± 0,05 mm |
| Dreckshage/Thomson | WM60Z | ± 0,05 mm |
| Dreckshage/Thomson | MLSM80Z | ± 0,05 mm |
| Festo | EGC-80- -TB-KF | ± 0,08 mm |
| Festo | ELGA-TB-G-80 | ± 0,08 mm |
| Festo | ELGA-TB-KF-80 | ± 0,08 mm |
| Festo | ELGA-TB-RF-80 | ± 0,08 mm |
| Festo | ELGC-TB-KF-60-800 | ± 0,1 mm |
| Festo | ELGS-TB-KF-45 | ± 0,1 mm |
| Festo | ELGE-TB-35 | ± 0,1 mm |
| Festo | ELGG-TB-...-45 | ± 0,1 mm |
| Festo | ELGR-TB-45-500-0H | ± 0,1 mm |
| Rollon | Modline, ZMCH | ± 0,1 mm |

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

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

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

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

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

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

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

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

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

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

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

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

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

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

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

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

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

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsigen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

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

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

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

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

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

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

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

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

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

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuenger

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

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

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

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

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

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

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

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

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

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

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

Band 84

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

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

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den 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 Osmer

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

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

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

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

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

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

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

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

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

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

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

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

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

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

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

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

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

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

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

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

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

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

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

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

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

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

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

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

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

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

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

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

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

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

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

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

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

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

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

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

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

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

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

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

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

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

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

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

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

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

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

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

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

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

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

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

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügspalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

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

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen
Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner
Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der
Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten
Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und
Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und 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 Burtcher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

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

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebadé

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschalen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

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

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

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

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

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

