

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

Tobias Storz

**Flexibel automatisierte Assemblierung
von Li-Ionen-Pouchzellen**

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette
Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 286



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

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

Tobias Storz

**Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-
ionen-Pouchzellen**
Agile Anlagentechnik für die Prozesskette
Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 286

**Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen
Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung,
Kontaktierung und Heißsiegeln**

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

M.Sc. Tobias Storz
aus 76185 Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 29.08.2024
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Albert Albers

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., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9681-1

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

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die Grundlage für die vorliegende Dissertation wurde im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk – Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie erarbeitet. Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner Arbeit und der Übernahme des Hauptreferats, dem mir entgegengebrachten Vertrauen sowie für die stets fruchtbaren Diskussionen, welche neben der fachlichen auch meiner persönlichen Weiterbildung dienen. Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Albers für die Übernahme des Koreferats bedanken, sowie bei Frau Prof. Dr.-Ing. Anne Meyer für das Begleiten des Amtes als Prüfungsvorsitz.

Ganz besonderer Dank gilt meinen vielen studentischen Hilfskräften und Abschlussarbeitern, ohne welche die vollbrachte Leistung nicht möglich gewesen wäre. Hier möchte ich stellvertretend Herrn Marcel Vogt, Herrn Pratheepan Palendran, Frau Caroline Fröhlich, Frau Selina Krey, sowie Herrn Lino Reinschmidt erwähnen.

Meinen Kollegen der MAP danke ich für fast 5 Jahre, in denen wir in fachlichem sowie persönlichem Austausch gemeinsam gewachsen sind, in denen wir im Team jedoch auch unsere individuellen Ziele verfolgen konnten.

Weiterhin möchte ich mich bei Anne-Sophie Rossol bedanken, die mir den Weg zum wbk geebnet hat und mich stets mit Rat und Tat auf meiner Reise zur Promotion begleitet hat.

Letztlich bedanke ich mich bei meinen zahlreichen Freunden und bei meiner Familie sowie bei meiner Soli, die stets für den nötigen Ausgleich in meinem Leben gesorgt haben.

Karlsruhe, 29. August 2024

Tobias Storz

Abstract

The disparity of the nature of industrial lithium-ion cell mass production and the trend towards highly customized products and rising number of niche markets based on lithium-ion battery driven products poses a challenge for further product innovation. A flexible, scalable production system as a response to a demand for highly customized lithium-ion cells in low to mid-volumes is a promising concept to complement future cell production besides highly specialized, high output production lines. This dissertation investigates the development of flexible stacking, contacting, packaging processes, and associated novel machinery, with a specific focus on their engineering aspects.

Through a thorough review of scholarly articles and industry reports as well as commercially available components and systems, the study establishes a theoretical framework for understanding the flexibilisation of lithium-ion cell production. Real-world case studies provide practical insights into the implementation of flexible manufacturing strategies, highlighting the strengths and limitations of various approaches for equipment implementation.

The research findings demonstrate that flexible stacking, contacting, packaging processes implemented as novel, modular machinery offer a viable alternative for low to mid-scale lithium-ion cell production regarding product quality and productivity. These flexible approaches aim to empower manufacturers to quickly address customization demands and efficiently respond to varying production numbers. The developed and discussed flexible production system for lithium-ion cells thereby helps reducing time-to-market and optimizing production resource utilization.

In conclusion, this dissertation introduces the understanding of the flexibilisation of lithium-ion cell production in response to customization requirements for less than high-scale production volumes. By focusing on the real life implementation of flexible stacking, contacting and packaging processes by novel machinery, the research provides first insights for both industry and research. Considering flexible manufacturing systems for lithium-ion cell production can spark innovation, enable efficient customization, and ensure competitiveness in the highly competitive, fast-paced lithium-ion battery industry and comparable markets.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.2.1 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Li-Ionen-Zellen	5
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise	6
2.1.2 Zelltypen	8
2.1.3 Prozesse und Anlagen in der Pouch-Zellproduktion	11
2.2 Agiles Produktionssystem	22
2.2.1 Konzept der agilen Produktion	22
2.2.2 Agile Batteriezellproduktion	26
2.3 Heißsiegeln & Alternativprozesse	27
2.3.1 Grundlagen des Heißsiegeln	28
2.3.2 Prozessalternativen	33
2.3.3 Siegelnahtprüfung	35
3 Eigener Ansatz	40
3.1 Anforderungsanalyse	40
3.2 Konzeptentwicklung	41
3.3 Produktionsmodul- und Prozessentwicklung	44
3.4 Umsetzung und Validierung	45
3.5 Bewertung	46
4 Ergebnisse	47
4.1 Anforderungen	47
4.1.1 Flexibilität	47

4.1.2	Produktivität	50
4.1.3	Qualität	51
4.2	Raum- und Materialflusskonzept	53
4.2.1	Flächenbedarf Produktionsmodul	53
4.2.2	Gesamtraumkonzept	55
4.2.3	Auswahl der Materialflusslösung	57
4.3	Funktions- und Prozessanalyse	60
4.3.1	Einzelblattstapeln	60
4.3.2	Kontaktieren	70
4.3.3	Verpacken	72
4.4	Umsetzung und Validierung	76
4.4.1	Produktionsmodul Stapeln	77
4.4.2	Produktionsmodul Kontaktieren	85
4.4.3	Produktionsmodul Verpacken	86
4.4.4	Gesamtanlage	95
4.5	Bewertung der neuartigen Anlagentechnik	101
4.5.1	Bewertung der Produktionsmodule	101
4.5.2	Gesamtanlage	107
5	Alternativer Siegelprozess	108
5.1	Motivation	108
5.2	Prozessauswahl	108
5.3	Prozessentwicklung	110
5.4	Anlagenentwicklung	118
5.5	Weiteres Vorgehen	127
6	Zusammenfassung und Ausblick	128
6.1	Zusammenfassung	128
6.2	Ausblick	129
	Literaturverzeichnis	131
	Abbildungsverzeichnis	I

Tabellenverzeichnis

VII

Anhang

IX

Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
KIT	Karlsruher Institut für Technologie	
wbk	Institut für Produktionstechnik	
Li	Lithium	
HF	Fluor-Wasserstoff	
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid	
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat	
LCO	Lithium-Cobalt-Oxid	
SEI	Solid-Electrolyte-Interface	
PA	Polyamid	
PET	Polyethylenterephthalat	
Al	Aluminium	
PP	Polypropylen	
$\dot{q}_{\vec{x}}$	Flächennormierter Wärmestrom	[W/m ²]
α	Kehrwert des Wärmeübergangswiderstands	[W/(m ² *K)]
R	Wärmeübergangswiderstand	[m ² *K/W]
c_p	Spezifische Wärmekapazität	[J/(kg*K)]
A	Kontaktfläche zwischen Heißsiegelbalken und Werkstück	[m ²]
V	Werkstückvolumen zwischen Heißsiegelbalken	[m ³]
$\lambda(T)$	Temperaturabhängiger Wärmeleitkoeffizient	[W/(m*K)]
$\nabla T(\vec{x})$	Ortsabhängiger Temperaturgradient	[K/m]
He	Helium	
T	Temperatur	[K]
T_{∞}	Temperatur der Heißsiegelbalken	[K]
T_0	Anfangstemperatur der Werkstückoberfläche	[K]
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	

F	Gesamtfläche	[m ²]
F_F	Fertigungsfläche	[m ²]
F_{ZL}	Zwischenlagerfläche	[m ²]
F_T	Transportfläche	[m ²]
F_Z	Zusatzfläche	[m ²]
BaTec	Batterietechnikum	
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm	
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	
HMI	Human Machine Interface, Nutzerinterface	
HSB	Heißsiegelbalken	
PID	Proportional-Integral-Derivativ	
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture	
SBM	SmartBatteryMaker	
P_T	Temperaturquotient	[-]
T_I	Temperatur in der Siegelfläche	[K]
T_M	Schmelztemperatur	[K]
φ	Winkelposition der Zelle	[rad]
$s(\varphi)$	Abstand der Siegelnaht von der Drehachse in Abhängigkeit der Winkelposition	[m]
$\alpha(\varphi)$	Winkel der Siegelnaht zur Radialrichtung der Drehachse in Abhängigkeit der Winkelposition	[rad]

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch die stetig voranschreitende Elektrifizierung der Energiespeicherung/Energie-wandlung in vielen Branchen findet die Lithium-Ionen-Batterietechnologie als die derzeit leistungsfähigste am Markt verfügbare Speichertechnologie immer mehr Verwendung unter verschiedensten Randbedingungen. In Abbildung 1.1 ist dargestellt, wie die sich der Markt für Li-Ionen-Batterien zwischen den Jahren 2015 und 2020 entwickelt hat und wie dieser sich bis zum Jahr 2025 entwickeln wird (Gerstin 2020, S. 1). Der Trend zur weiteren Verbreitung ist dabei klar sichtbar und unter anderem mit der Elektrifizierung des Individualtransports und den damit einhergehenden großen Stückzahlen für Batteriezellen erklärbar. Mit steigender Anzahl verschiedener Anwendungen, welche Lithium-Ionen-Zellen als Energiespeicher verwenden, diversifizieren sich auch die Randbedingungen und Anforderungen, die an die Batterie gestellt werden.

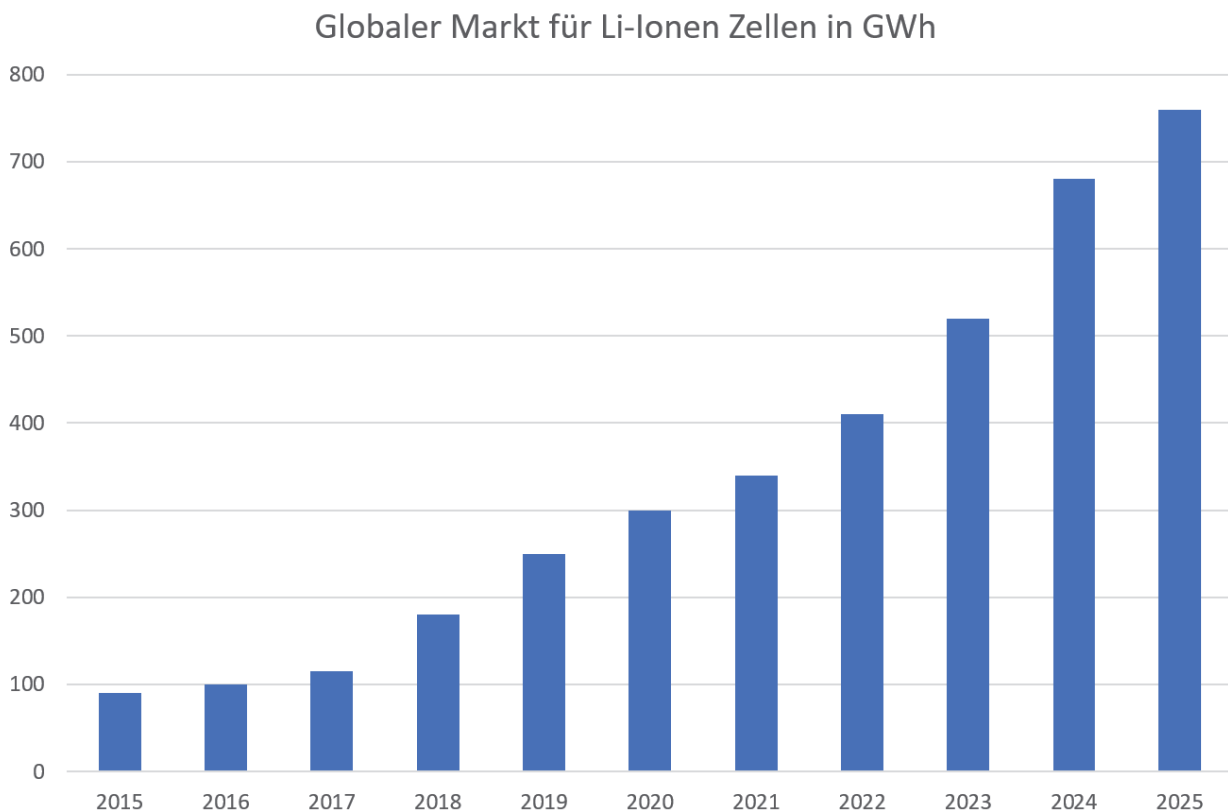


Abbildung 1.1: Entwicklung des globalen Markts für Li-Ionen-Batterien in GWh von 2015 bis 2020 anhand von Daten und 2020-2025 als Prognose nach (Gerstin 2020)

Durch die Produktion von Batteriezellen in starren Produktionslinien ist es jedoch derzeit nicht umsetzbar, für jede Anwendung eine optimierte Zelle zu entwickeln und in niedriger bis mittlerer Stückzahl zu produzieren. Dies führt dazu, dass Zellhersteller eine Produktpalette entwickeln und diese ca. 3-5 Jahre als Standardbatteriezellen anbieten, bis im Anschluss eine neue Generation von Zellen und der dazugehörigen Produktionslinie eingeführt wird. Die Umrüstung von bestehenden Produktionslinien lohnt sich aufgrund der hohen Spezifizierung auf einen bestimmten Zelltyp nur in seltenen Fällen. Die Kunden bedienen sich also an einem vom Anbieter getriebenen Markt und verwenden möglichst passende Standardbatteriezellen für Ihre Produkte. Lediglich für Produkte mit sehr großer Stückzahl lohnt sich die Entwicklung einer optimierten Batteriezelle inklusive der Produktionslinie.

Um verschiedene Zellen in geringer bis mittlerer Stückzahl kostengünstig herzustellen, bedarf es also eines alternativen Produktionssystems für Li-Ionen-Zellen. Soll beispielsweise ein komplexer Bauraum möglichst komplett mit Zellen gefüllt werden, so werden verschiedene Zellen mit komplexer Geometrie dazu nötig sein. Dies ist in Abbildung 1.2 veranschaulicht.

Damit verschiedene Zellen mit nur einem Produktionssystem gefertigt werden können, muss dieses hoch flexibel gestaltet sein. Das Institut für Produktionstechnik (wbk) am

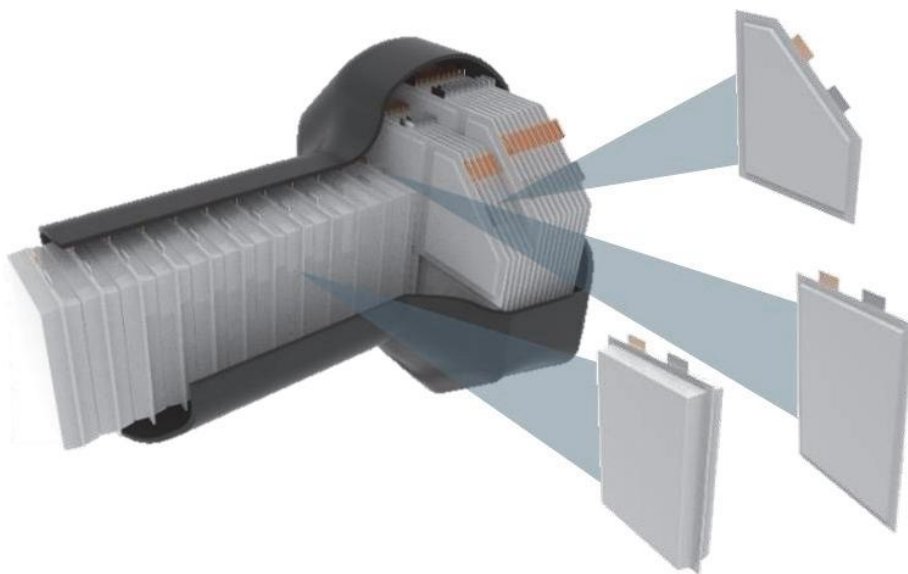


Abbildung 1.2: Darstellung eines komplexen Bauraums und verschiedener Batteriezellen, welche zu einem passenden Batteriemodul kombiniert werden

Karlsruher Institut (KIT) hat dazu den Ansatz des agilen Produktionssystems für Li-Ionen-Pouch-Zellen gewählt, welches im Folgenden noch näher erläutert wird. Im Rahmen dieser Dissertation finden Prozessuntersuchungen und -entwicklungen statt, um dieses neuartige Produktionssystem zum flexiblen Zellbau zu befähigen.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Flexibilisierung der Assemblierung von Li-Ionen-Pouch-Zellen in einem agilen Produktionssystem. Dabei wird eine Produktionszelle für die Schritte Stapelbildung, Kontaktieren sowie Verpacken praktisch umgesetzt.

Ziel ist es, für jeden der oben genannten Prozessschritte jeweils eine flexible, autark agierende Anlage zu entwickeln. Prozessuntersuchungen und –analysen begründen dabei die ausgewählte Prozesstechnik, die Konstruktion und Bauteilauswahl erfolgt auf dieser Basis. Durch die darauf folgende Inbetriebnahme der Anlagen und die Validierung kann anschließend eine Bewertung der einzelnen Anlagen hinsichtlich ihrer Produktivität, Flexibilität und Qualität erfolgen.

Die Integration der flexiblen Anlagen zu einer vorher konzipierten Produktionszelle im Sinne des agilen Produktionssystems (s.u.) bildet die Grundlage zur Bewertung des neuartigen Produktionsansatzes. Zum Abschluss werden die Anlagen im Rahmen der Produktionszelle als Gesamtproduktionssystem betrachtet und mit einer konventionellen Anlage verglichen.

1.2.1 Aufbau der Arbeit

Nach dem in Kapitel 1 die zugrunde liegende Motivation sowie die Zielsetzung für diese Arbeit erläutert wird, werden in Kapitel 2 die zum weiteren Verständnis der Arbeit nötigen Grundlagen sowie der dazugehörige Stand der Technik beschrieben. Dazu werden zunächst Lithium-Ionen-Zellen in ihrem Aufbau und ihrer Funktion erläutert, um im Anschluss die konventionelle Zellproduktion anhand der Produktionsprozesse und Anlagen darzustellen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Prozessschritten Stapeln und Verpacken/Heißsiegeln. Darauf folgt die Beschreibung eines alternativen Produktionssystems, welches in dieser Arbeit betrachtet wird: das agile Produktionssystem für Lithium-Ionen-Zellen. Abgeschlossen wird das Kapitel 2 mit den Grundlagen der Dichtheitsprüfung.

In Kapitel 3 wird der eigene Ansatz erläutert, welcher verfolgt wird, um die oben genannte Zielsetzung zu erreichen. Dazu wird dargelegt, wie die Flexibilisierung der Zellauswertung im Rahmen dieser Arbeit stattfindet und im Anschluss daran wie die Bewertung der Ergebnisse vorgenommen wird.

Anschließend werden in Kapitel 4 die Ergebnisse der in Kapitel 3 vorgestellten Arbeitsschritte vorgestellt und bewertet.

Die Auswahl und die Entwicklung eines alternativen, vollflexiblen Siegelverfahrens und das daraus abgeleitete Anlagenkonzept werden in Kapitel 5 diskutiert.

In Kapitel 6 werden abschließend eine Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung sowie ein Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und der zugehörige Stand der Technik erläutert, auf welchen diese Arbeit aufbaut. Dazu wird in Kapitel 2 auf Lithium-Ionen-Zellen eingegangen. Nachdem die generelle Funktionsweise in Kapitel 2.1.1 dargestellt wird, werden verschiedene Zelltypen und deren Aufbau in Kapitel 2.1.2 erläutert. Der Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Pouch-Zelle wird in Kapitel 2.1.3 ausführlich diskutiert.

Nachdem in Kapitel 2.2 das agile Produktionssystem der klassischen Produktionslinie gegenübergestellt und im Detail erklärt wird, wird in Kapitel 2.3 auf den Heißsiegelprozess, Prozessalternativen sowie Qualitätssicherungsmethoden für Siegelnähte eingegangen.

2.1 Li-Ionen-Zellen

Lithium-Ionen-Batteriezellen sind galvanische Zellen mit Lithium als Energieträger und werden seit den 1990er Jahren kommerziell verwendet und seitdem immer weiter entwickelt (Korthauer 2013, S. 13). Aufgrund des in Lithium maximalen Normalpotentials zur Wasserstoffelektrode von ca. $-3,02$ V lassen sich mit auf Lithium basierten Energiespeichern theoretisch die höchsten Energiedichten bei Energiespeichern, welche bei Raumtemperatur nutzbar sind, erreichen (Bauer 1972, S. 150). In Abbildung 2.1 sind die Potentialdifferenzen verschiedener Elemente dargestellt. Die Energiedichte beschreibt die in der Zelle gespeicherte Energie bezogen auf deren Volumen (volumetrische Energiedichte, Einheit J/m^3 oder anwendungsnah Wh/l) oder bezogen auf deren Gewicht (gravimetrische Energiedichte, Einheit J/kg oder anwendungsnah Wh/kg) und ist in mobilen Anwendungen ein entscheidender Faktor. Theoretisch lassen sich mit Lithium-Ionen-Zellen Energiedichten von $2.800 Wh/kg$ erreichen (Bauer 1972, S. 150), in der praktischen Umsetzung werden jedoch derzeit gravimetrische Energiedichten im Bereich von bis zu lediglich $250 Wh/kg$ erreicht (Kurzweil und Dietlmeier 2018, S. 174). Zum Vergleich liegt die Energiedichte von Otto-Kraftstoff bei ca. $12.000 Wh/kg$ (Spicher 2012, S. 98).

Lithium-Ionen-Zellen sind mit wenigen Ausnahmen wiederaufladbar (sog. Sekundärbatterien), industriell produzierbar und erreichen eine im Vergleich zu anderen Batterien hohe Energiedichte bei gleichzeitiger guter kommerzieller Verfügbarkeit. Aus diesen

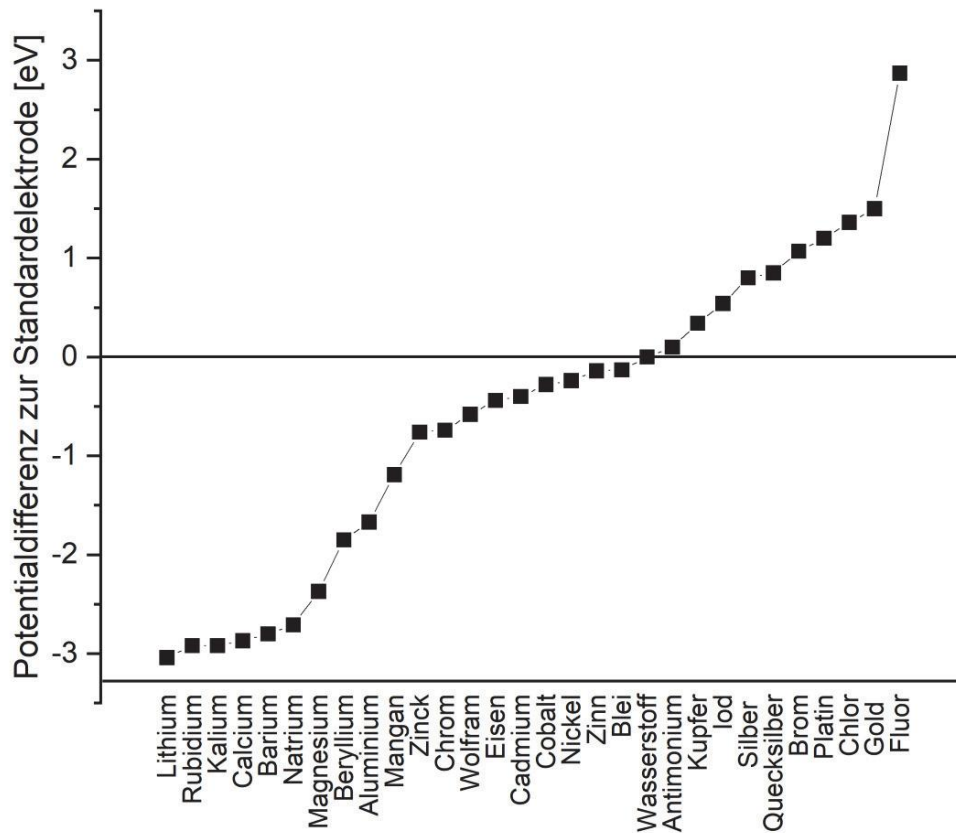


Abbildung 2.1: Die elektrische Potentialdifferenz der Metalle gegenüber der Standard-elektrode aus Wasserstoff nach (Schafmeister 1927, S. 414)

Gründen sind Lithium-Ionen-Zellen in einer großen Bandbreite an Anwendungen zu finden, allen voran dem Bereich der Consumer Electronics (Handys, Laptops, Kameras,...) und der Elektromobilität (Elektroautos, e-Bikes, e-Scooter, ...).

2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Eine Lithium-Ionen-Zelle ist eine galvanische Zelle, es sind Primärzellen möglich, welche beim Entladevorgang das Elektrodenmaterial irreversibel „verbrauchen“ und daher nicht wiederaufladbar sind. Diese Arbeit behandelt jedoch ausschließlich wiederaufladbare Sekundärzellen, weswegen im Folgenden der Aufbau und die Funktion dieser beschrieben sind.

Grundlegend besteht eine Lithium-Ionen-Zelle aus den Elektroden (Anode und Kathode), dem Separator, dem Elektrolyten sowie der Verpackung. Die Elektroden beste-

hen jeweils aus dem Stromsammler und der Beschichtung. Der Stromsammler hat dabei die Aufgabe als Elektronenleiter den elektrischen Strom von der Beschichtung aus der Zelle heraus (Entladen) bzw. in die Beschichtung hinein (Laden) zu leiten. In der Regel besteht der Stromsammler der Anode aus einer Kupferfolie, als Kathodenstromsammler wird Aluminiumfolie verwendet. Die Beschichtung besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: Dem Aktivmaterial, dem Binder sowie dem Leitruß. Das Aktivmaterial haftet mittels des Binders in Partikeln auf der Stromsammlerfolie, ebenfalls vernetzt der Binder das Aktivmaterial so, dass dieses als fester Stoffverbund und nicht als Pulver auf der Elektrode vorliegt. Die jeweiligen Aktivmaterialien der Elektroden weisen einen schichtartigen Aufbau auf. In diese Schichten werden die Lithiumionen beim Lade- bzw. Entladevorgang eingelagert. Wird die Zelle beispielsweise entladen, so bewegen sich die Li^+ -Ionen aus dem Anoden-Wirtsgitter (Deinterkalieren) durch den Elektrolyten und den Separator, welcher für Li^+ -Ionen durchlässig ist, nicht jedoch für Elektronen, und werden im Wirtsgitter der Kathode eingelagert (Interkalieren). Durch das Interkalieren der Ionen kann sich der Atomabstand im Wirtsgitter und damit das Volumen der Elektrode ändern. Diesen Vorgang nennt man „Zellatmung“, dabei kann eine Zelle eine Volumenänderung von bis zu ca. 10% erfahren (Haag 2020, S. 8). Dies muss bei der mechanischen Auslegung der Zell- und Batteriegehäuse entsprechend berücksichtigt werden.

Die Elektroden sind von einem für Li^+ -Ionen durchlässigen Separator räumlich und elektrisch getrennt. Der elektrische Strom muss also durch den Stromsammler über den Verbraucher fließen. Ist der Separator beschädigt und für Elektronen permeabel, ist die Zelle intern kurzgeschlossen und defekt bzw. stark beschädigt.

Der Elektrolyt besteht aus Leitsalzen und Additiven, die in einem Lösungsmittel gelöst sind und dient somit als Konduktor für die Li^+ -Ionen, welche zum (De-) Interkalieren von Elektrode zu Elektrode wandern. Eine vollständige Benetzung der Elektroden- und Separatoroberflächen mit Elektrolyt ist notwendig, um einen möglichst schnellen und homogen verteilten Ionenfluss zu ermöglichen. Elektrolyte der aktuellen Generation reagieren in der Regel stark exotherm mit Wasser, wobei eine nicht vernachlässigbare Menge an verschiedenen Gasen entsteht, unter anderem auch hochgiftiges Fluorwasserstoff-Gas (HF) (Larsson et al. 2014, S. 414), weswegen der Wassergehalt innerhalb einer Zelle auf ein Minimum reduziert werden muss.

Die Verpackung beinhaltet den Zellstapel (redundante Anordnung von Elektroden und Separatoren) sowie den Elektrolyten. Die Stromsammler der Elektroden sind elektrisch

mit den Terminals/Ableitern der Zelle verbunden, über welche die Zelle elektrisch kontaktiert wird. Die Verpackung schützt den Zellstapel vor Verunreinigungen, Eindringen von Wasser und vor mechanischen Einflüssen, weiterhin wird das Auslaufen von Elektrolyt oder Gas aus der Zelle unterbunden. Dazu muss die Verpackung ausreichend dicht sein (Inficon 2018, S. 1). Das Zellgehäuse kann auch als lasttragendes Element in das jeweilige Produkt integriert werden, wenn es entsprechend dimensioniert wird. In den meisten Kühlkonzepten wird die im Inneren der Zelle anfallende Wärme über das Gehäuse in die Umgebung abgeführt.

2.1.2 Zelltypen

Der in Kapitel 2.1.1 beschriebene grundlegende Aufbau von Li-Ionen-Zellen hat zu drei kommerziell verwendeten Zelltypen geführt, welche sich hauptsächlich durch ihr Gehäuse und durch die jeweiligen Stapelbildungsverfahren unterscheiden. Diese sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

Am Markt werden hauptsächlich prismatische Zellen, zylindrische Zellen sowie Pouch-Zellen angeboten (Baumeister 2017, S. 8ff). Für Forschungszwecke werden oft Knopfzellen verwendet, welche am Markt jedoch kaum Anwendung finden, weshalb diese in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

Die prismatische Zelle zeichnet sich durch ihr quaderförmiges, aus Blech bestehendem Gehäuse aus. Das Gehäuse wird in der Regel tiefgezogen. In diesem Gehäuse wird in oder auch mehrere Zellstapel platziert, diese Zellstapel können sowohl flachgewickelt als auch im Einzelblattstapelverfahren produziert sein. Die Stromsammler der Elektroden werden mit den Terminals im Deckel der Zelle verschweißt, bevor der Deckel aufgesetzt und mit dem Rest des Gehäuses verschweißt wird.

Vorteile der prismatischen Zelle sind einerseits eine gute Raumausnutzung bei Verwendung mehrerer Zellen in einer Batterie aufgrund des rechteckigen Querschnitts der Zellen sowie gute mechanische Eigenschaften aufgrund des festen, stabilen Gehäuses. Bei Gasentwicklung in der Zelle baut sich jedoch schnell ein gefährlicher Druck auf, welcher durch ein Überdruckventil im Deckel entweichen kann. Durch die Notwendigkeit eines Ventils wird die Produktion jedoch teurer. Durch die Metallgehäusewände kann vor allem im dicht gepackten Modul die Wärme schlecht abgeleitet werden, weshalb oft Kühlplatten zwischen einzelnen Zellen verbaut werden müssen. Der größte

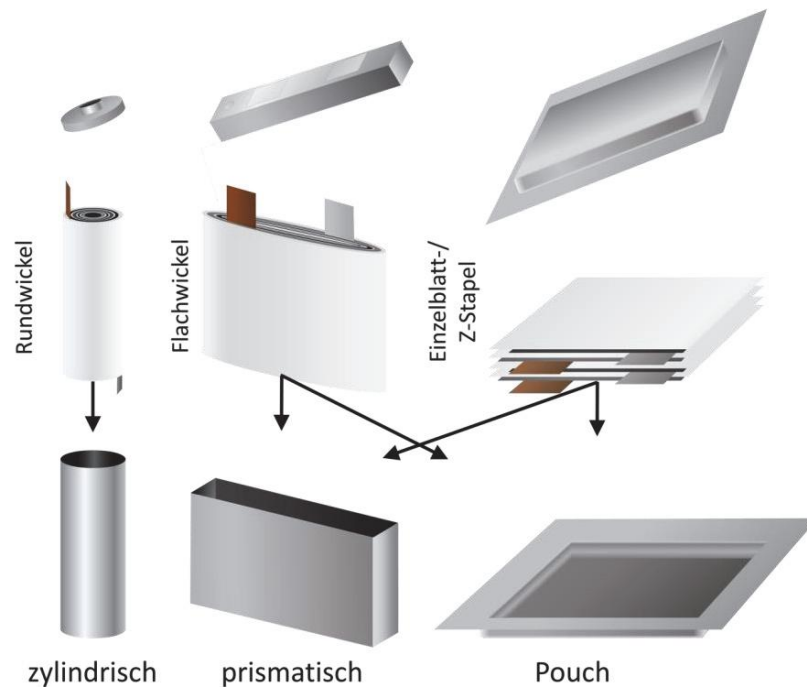


Abbildung 2.2: Die drei Bauarten von Lithium-Ionen-Zellen, jew. mit Gehäuse und zugehörigen Zellstapel

Nachteil prismatischer Zellen ist jedoch eine im Vergleich geringe gravimetrische Energiedichte, da das (elektrisch inaktive) Gehäuse einen relativ großen Teil des Gewichts der Zelle ausmacht. (Dormann et al. 2021, S. 16)

Die zylindrische Zelle besitzt ein Gehäuse aus sehr dünnem Blech, welches zu einem Zylinder gerollt und fixiert wird. In diesem Gehäuse wird der zuvor auf einem Runddorn gewickelte Zellstapel untergebracht, bevor die Zelle an den Stirnseiten mit Blechen, die gleichzeitig als Terminals zur elektrischen Kontaktierung dienen, verschlossen wird. Auch haushaltsübliche Batteriezellen wie beispielsweise AA-Batterien sind als zylindrische Zellen ausgeführt.

Vorteile der zylindrischen Zelle sind ihr einfacher, stabiler Aufbau und die aufgrund der wenigen Bauteile und schnellen Wickelverfahren für den Stapel günstige & schnelle Herstellung. Nachteile sind die schlechte Raumausnutzung in einem Modul aufgrund der zylindrischen Form und damit eine relativ geringe volumetrische Energiedichte. Durch ein kleines Oberflächen-Volumen-Verhältnis neigen zylindrische Zellen zu thermischen Problemen, weshalb bei hoher Energieabgabe unbedingt ein geeignetes Kühlsystem verbaut werden muss. (Baumeister 2017, S. 9)

Eine weitere kommerziell erfolgreiche Bauart für Lithium-Ionen-Zellen ist die sogenannte Pouch-Zelle (von Englisch *pouch* = *Beutel*, auch *Coffeebag-Zelle* oder *Softbag-Zelle* genannt). Der Name kommt von der Art der Verpackung: der Zellstapel wird in eine Aluminium-Kunststoff-Verbundfolie eingeschweißt. Die Folie ähnelt dabei der Verpackungsfolie einiger Lebensmittel wie z.B. Kaffeebohnen. Die äußere Kontaktierung der Zelle erfolgt über die Ableiterbleche, welche mit dem Zellstapel verbunden sind und gasdicht durch die Verpackung geführt werden. Näheres dazu in Kapitel 2.1.3.2. Der Zellstapel ist bei Pouch-Zellen nicht gewickelt, sondern mit gestapelten Einzelblätter ausgeführt. Die Integration eines flachgewickelten Stapels ist aufgrund der sehr engen Biegeradien, die sich in der vakuumierten, labilen Verpackung ergeben, nur mit speziell produzierten Elektrodenbahnen möglich (Beschichtungslücke am Ort der Biegung) und findet in der Praxis kaum Anwendung.

Aus der labilen Verpackung ergeben sich die Nachteile der Pouch-Zelle: geringe mechanische Stabilität, Undichtigkeiten bei mechanischer Beschädigung sowie durch die Verwendung von Einzelblattstapeln eine höhere Produktionszeit gegenüber den anderen Zelltypen, welche gewickelte Zellstapel verwenden. Die Vorteile von Pouch-Zellen sind ebenfalls durch das Gehäuse bedingt. So kann über die große Oberfläche und die dünne Verpackung Wärme gut aus der Zelle abgeführt werden. Pouch-Zellen weisen eine gute volumetrische und gravimetrische Energiedichte auf. Für die vorliegende Arbeit ist die Flexibilität jedoch der ausschlaggebende Vorteil: da der Zellstapel aus Einzelblättern gebildet wird und die Verpackungsfolie leicht zugeschnitten werden kann, ist die Pouch-Zelle der einzige Zelltyp, dessen Format leicht geändert werden kann. So können nicht nur rechteckige Zellen, sondern auch Zellen anderer Geometrie produziert werden (siehe Abbildung 2.3). (Baumeister 2017, S. 9)

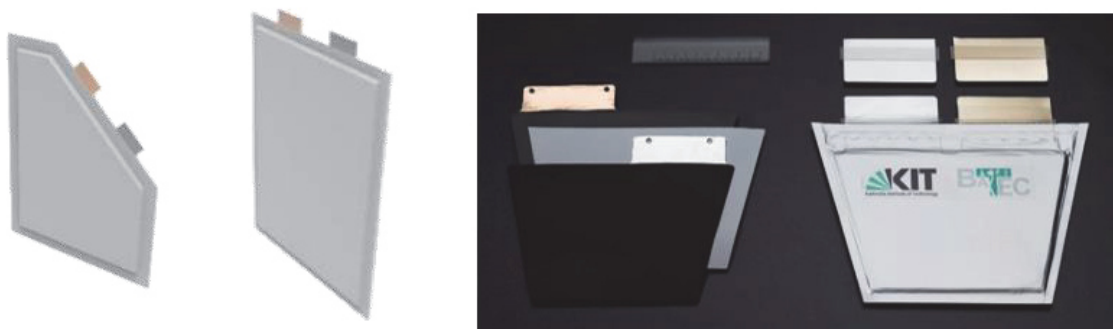


Abbildung 2.3: Verschiedene Zellformate von Pouch-Zellen als Modell und als reale Umsetzung mit zugehörigen Einzelblättern

Da die Pouch-Zelle diese Formatflexibilität bietet, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit im Folgenden ausschließlich mit Pouch-Zellen.

2.1.3 Prozesse und Anlagen in der Pouch-Zellproduktion

Die industrielle Produktion von Pouch-Zellen wird in diesem Kapitel anhand der Prozesskette vorgestellt. Dabei wird zu jedem Prozess kurz auf die jeweilige aktuelle Anlagentechnik eingegangen. Grundsätzlich lässt sich die Zellfertigung in drei Teilbereiche einteilen: In der Elektrodenfertigung werden Anoden und Kathoden aus den Rohmaterialien hergestellt. Separatoren werden in der Regel nicht von Zellherstellern gefertigt, sondern von diesen zugekauft. Daher wird an dieser Stelle auf eine Vorstellung des für die vorliegende Arbeit irrelevanten Prozesses verzichtet. Die Elektrodenfertigung wird in Kapitel 2.1.1 betrachtet.

Nach der Herstellung der Elektroden und Separatoren werden diese, zusammen mit dem Verpackungsmaterial, zu einer Zelle assembliert, die Zellassemblierung wird in Kapitel 2.1.3.2 erläutert.

Abschließend wird die assemblierte Zelle durch ihre elektrische Aktivierung und Alterung fertig gestellt. Diese Prozesse der Aktivierung werden in Kapitel 2.1.3.3 näher vorgestellt.

Da sichergestellt werden muss, dass die Elektroden bei Kontakt mit dem Elektrolyten quasi keine Feuchtigkeit mehr beinhalten, werden diese an (je nach Hersteller und Zellchemie) unterschiedlichen Stadien in der Produktion getrocknet. Nach dieser Trocknung findet die Weiterverarbeitung in Trockenraumatmosfera statt, um eine Rückbefeuchtung zu verhindern. Oftmals findet die gesamte Zellassemblierung in Trockenraumatmosfera statt. Dabei wird die Umgebungsluft auf Taupunkte von -20°C bis -50°C entfeuchtet. Alle entsprechenden Anlagen und Personal befinden sich also in einer als Trockenraum ausgeführten Produktionshalle.

2.1.3.1 Elektrodenfertigung

Die Elektrodenfertigung beginnt mit dem Mischvorgang der Komponenten der Beschichtung der Elektroden. Diese Komponenten sind Aktivmaterial, Leitadditive, Binder sowie Lösungsmittel (Wang et al. 2020, S. 1). Aktivmaterial für Anoden ist in der Regel Graphit, deutlich weniger werden Siliziumanoden verwendet, Kathoden werden häufig mit Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxiden (NMC) in verschiedenen Mischungsverhält-

nissen hergestellt (Mekonnen et al. 2016, S. 4f). Dabei wird der Cobalt-Anteil seit Jahren immer weiter reduziert, da die Cobalt-Gewinnung und –Verarbeitung oft unter politisch und ethisch fragwürdigen Bedingungen geschieht (Sovacool 2019). Weitere für Kathoden verwendete Zellchemien sind beispielsweise Lithium-Eisenphosphat (LFP) oder Lithium-Cobaltoxid (LCO) (Haag 2020a, S. 5). Dabei unterscheiden sich die Aktivmaterialien hauptsächlich durch den Einfluss auf die maximale Laderate, die Zyklenfestigkeit, die Energiedichte und die Betriebssicherheit des Endprodukts Batteriezelle. Die Komponenten werden entweder in diskontinuierlichen Batch-Verfahren (beispielsweise im Planetenmischer) oder kontinuierlich (Extruder-Verfahren) homogen miteinander vermengt (Haarmann et al. 2021, S. 1f). Dabei entsteht der zähflüssige Slurry, welcher mittels Rohrleitungen oder diffusionsdichten Behältern zum nächsten Produktionsschritt, dem Beschichten, transportiert wird.

Beim Beschichten wird der Slurry auf die jeweilige Stromsammelrfolie, in der Regel Aluminium für Kathoden und Kupfer für Anoden, in kontrollierter Weise und homogener Schichtdicke ein- oder beidseitig aufgetragen. Elektroden werden aktuell im industriellen Maßstab ausschließlich als Rollenware, sogenannte Elektrodencoils hergestellt. Im Folgenden wird auf dieses Rolle-zu-Rolle-Verfahren eingegangen, im Anschluss werden Alternativen dazu kurz vorgestellt.

Beim Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsprozess wird der Slurry kontinuierlich oder intermittierend auf die Stromsammelrfolie aufgetragen. Dafür wird dieser in einem kontrollierten Volumenstrom, welcher gemeinsam mit der Düsengeometrie und der Bahngeschwindigkeit des Substrats die Nassfilmdicke bestimmt, über eine Schlitzdüse auf das Substrat aufgetragen. Alternativ zu Schlitzdüsen werden für Laborproduktionen auch Rakelverfahren oder indirekte Beschichtungsverfahren genutzt, in denen die Beschichtung zunächst auf eine in der Bahnführung eingesetzte Rolle aufgetragen wird und diese dann bei Kontakt mit dem Substrat an dieses abgibt. (Schmitt et al. 2013, S. 32). Es ist eine einseitige oder beidseitige Beschichtung möglich.

Alternativen zur klassischen Rolle-zu-Rolle-Nassbeschichtung bestehen in der Trockenbeschichtung, der Sprühbeschichtung sowie der Einzelblattbeschichtung.

Bei der Trockenbeschichtung wird die Trockenmischung aus Aktivmaterial, Leitadditiven und Binder direkt auf das Rollenmaterial homogen aufgebracht, bevor dieses durch beheizte Walzen komprimiert wird. Dabei wird der Binder plastisch so verformt, dass formschlüssige und kraftschlüssige Verbindungen zwischen den Partikeln entstehen.

Die Beschichtung haftet dabei adhäsiv auf dem Substrat. Dieses Verfahren befindet sich derzeit in der Entwicklung und wird nicht im industriellen Maßstab angewandt. Der Vorteil liegt in der exzellenten Energieeffizienz, da keine Trocknung (s.u.) nötig ist. Der Prozessschritt Kalandrieren (s.u.) wird ebenfalls überflüssig, da die Komprimierung der Beschichtung bereits beim Beschichtungsprozess erfolgt. (Hawley und Li 2019, S. 22)

Bei der Sprühbeschichtung wird der nanopartikelhaltige Slurry mittels Druckinertgas als Spray auf Substrat-Einzelblätter aufgetragen und im Anschluss unter Wärme getrocknet (David et al. 2014, S. 1f). Eine Alternative ist der Verzicht auf Lösungsmittel und die Verwendung einer elektrostatischen Sprühbeschichtung (Zhen et al. 2021, S. 1f). Beide Verfahren werden aktuell erforscht und nicht industriell angewendet.

Die Einzelblattbeschichtung erfolgt wie die Rolle-zu-Rolle-Nassbeschichtung, das Substrat ist jedoch keine kontinuierliche Bahn, sondern ein Einzelblatt. Die Relativbewegung der Schlitzdüse zum Substrat kann in diesem Fall entweder durch Bewegung des Substrats oder der Schlitzdüse erfolgen. Derzeit wird das Verfahren erforscht. Forschungsschwerpunkt ist dabei die Veränderung der Düsengeometrie im Prozess, um variable Beschichtungsgeometrien erzeugen zu können. (Ruhland et al. 2021, S. 99f)

Bei allen Beschichtungsverfahren ist bei beidseitiger Beschichtung die jeweilige Positionierung der Beschichtungskanten von absoluter Wichtigkeit, da bei Versatz der Beschichtungen keine gemeinsame Schnittlinie beim Ausschneiden der Elektroden gefunden werden kann. Dadurch wird der Materialausschuss erhöht und/oder die Qualität der Elektrode negativ beeinflusst.

Bei Nassbeschichtungsprozessen ist es notwendig, im nächsten Schritt das Lösungsmittel aus der Beschichtung zu entfernen. Für diesen Trockenprozess gibt es verschiedene technische Lösungen, bei Rolle-zu-Rolle-Prozessen kommt in der Regel ein Konvektionstrockner zum Einsatz. In diesem wird die Elektrodenbahn über eine Strecke von bis zu 40 Metern geführt und das Lösungsmittel mittels heißer Luft verdampft. Bei beidseitig beschichteten Elektroden wird die zweite Seite meist nach dem Trocknen der ersten Seite beschichtet und dann durch eine zweite Trocknerstrecke geführt, so dass sich Gesamtstrecken von ca. 80 Metern ergeben können. Beide Trocknerstrecken sind dabei übereinander angeordnet. (Kampker 2014, S. 62f)

Dies ist notwendig, da eine unbeschichtete oder trockene Elektrodenseite mit den Führungsrollen in Kontakt treten muss, um die Bahnspannung aufrecht zu erhalten und

einen problemlosen Materialfluss zu ermöglichen. Sollen beide Seiten gleichzeitig beschichtet werden, so müssen Luftschwebetrockner eingesetzt werden. Diese halten die Elektrodenbahn mit genau eingestellten Luftstrahlen waagrecht, während die Bahngeschwindigkeit hauptsächlich von der Rolle am Ende der Strecke aufgebracht wird. Die genaue Einstellung der Luftstrahlen, um die Bahn in der Schwebelage zu halten, ist jedoch sehr komplex und sensibel, weshalb diese Art der Trocknung wenig industrielle Verwendung findet. (Kampker 2014, S. 63)

Das Ziel bei jeder Beschichtung ist das Produzieren von Elektroden mit möglichst gleichmäßigem Flächengewicht und damit gleichmäßiger Kapazität pro Fläche (meist in der Einheit mAh/cm² angegeben), innerhalb der Toleranzgrenzen des Produkts.

Da das Lösungsmittel aus der Beschichtung verdunstet und nach oben aus der Beschichtung aufsteigt, entstehen in der trocknenden Beschichtung Poren und Kapillare. Da diese die volumetrische Energiedichte der Zelle senken, werden sie im nächsten Prozessschritt, dem Kalandrieren, minimiert bzw. gezielt eingestellt. Dabei wird die Elektrodenbahn zwischen zwei (beheizten) Walzen komprimiert und gezielt verdichtet. Eine gewisse Restporosität von ca. 30% wird benötigt, um Interkalationsvorgänge von Li-Ionen in die Wirtsgitter der Aktivmaterialien über die gesamte Schichtdicke zu ermöglichen. (Bold und Fleischer 2018, S. 571)

Nach dem Kalandrieren erfolgt gegebenenfalls das Slitting. Bei diesem Prozess werden die Elektrodenbahnen in Bahnrichtung geteilt und somit auf ihre finale Breite zugeschnitten. Dies geschieht meist über feststehende Rundmesser, über welche die Bahn gezogen wird.

Bei der Produktion von Pouch-Zellen werden einzelne Elektrodenblätter benötigt. Daher müssen diese aus dem Elektrodencoil ausgeschnitten werden. Dieser Prozessschritt wird Vereinzeln genannt und wird mit Bandstahlschnitten, (Fein)Stanzen oder Laserschneidprozessen durchgeführt. Dabei sind Anforderungen an die Flexibilität, Stückzahl, Anlagenverfügbarkeit und -kosten sowie Schnittkantenqualität die Entscheidungsgrundlage für die Prozessauswahl. (Baumeister 2017, S. 47ff)

2.1.3.2 Assemblierung

Der erste Prozess in der Assemblierung von Pouch-Zellen ist das Stapeln. Dabei werden mehrere einzelne galvanische Zellen gebildet, die dann parallel geschaltet als Batteriezelle fungieren. Dazu muss ein Zellstapel gebildet werden, welcher abwechselnd

aus Anoden- und Kathodenblättern besteht, welche jeweils durch Separator elektrisch voneinander isoliert werden. Diesen sich wiederholenden Lagenaufbau aus Anode-Separator-Kathode-Separator haben alle Li-Ionen-Sekundärzellen gemein. Die Anzahl der Lagen bestimmt dabei neben Aktivmaterial, dessen Schichtdicke und den Abmessungen der Elektroden die Kapazität der Batteriezelle.

Für Pouch-Zellen werden in der Regel zwei Stapelverfahren angewandt, das sogenannte Z-Stapeln und das Einzelblattstapeln. Diese sind schematisch in Abbildung 2.4 dargestellt.

Beim Z-Stapeln liegt der Separator als Bahnware vor und wird von Niederhaltern flach auf die Stapelfläche gedrückt. Darauf wird dann ein Elektrodenblatt, bspw. Anode, aus einem Magazinspeicher oder Förderband entnommen, mittels einer optischen Einrichtung wird die Position des Elektrodenblattes am Greifer erfasst und daraufhin wird das Elektrodenblatt ausgerichtet, um die gewünschte Stapelqualität zu erreichen. Danach wird dieses auf dem auf der Separatorfläche flach liegenden Separator abgelegt. Die Separatorbahn wird nun über die Elektrode gelegt und auf der gegenüberliegenden Seite niedergehalten, bevor darauf ein Kathodenblatt ausgerichtet und dann abgelegt wird. Dieser Prozess wiederholt sich solange, bis die gewünschte Stapelhöhe erreicht

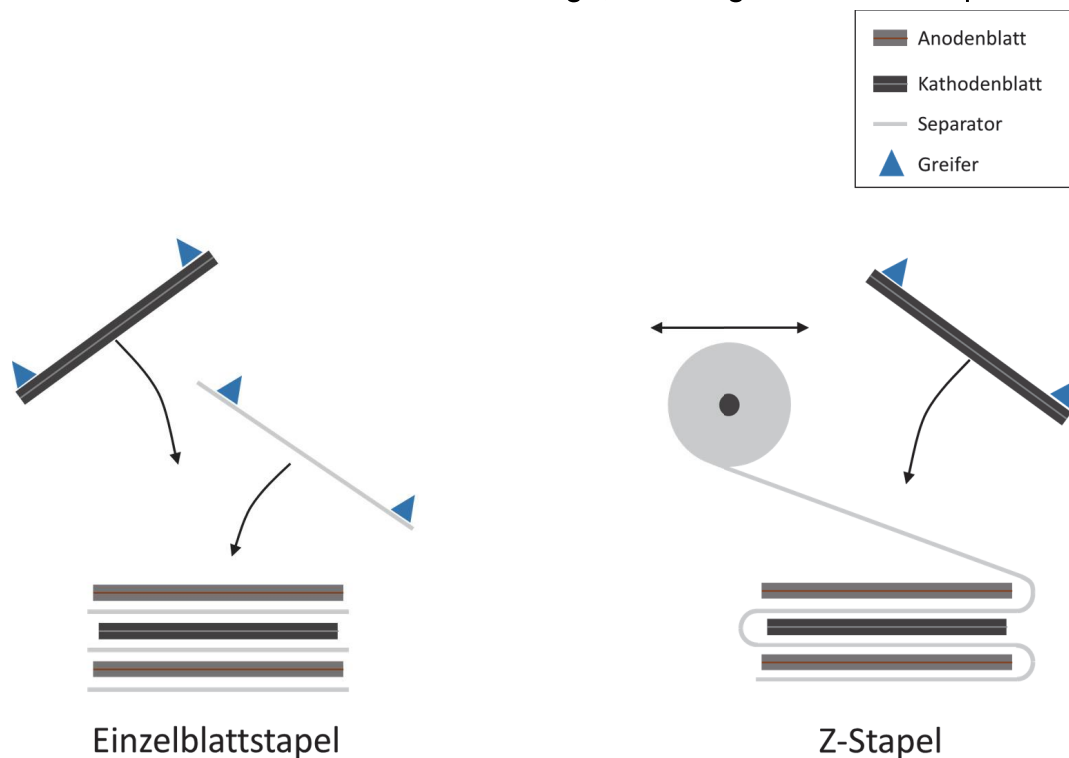


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau von Einzelblatt- und Z-Stapel bei der Stapelbildung

wird, dann wird der Separator abgeschnitten und der Zellstapel ist fertig. Die Separatorbahn wird also kontinuierlich Z-förmig gefaltet und zwischen jeder Lage abwechselnd Anoden- und Kathodenblätter positioniert. Der Vorteil des Verfahrens ist eine relativ schnelle Prozesszeit und hohe Prozesssicherheit aufgrund der Verarbeitung des Separators als Bahnware. Nachteile sind eine geringere volumetrische und gravimetrische Energiedichte im Vergleich zum Einzelblattstapeln, da aus produktionstechnischen Aspekten mehr Separator verarbeitet wird, als produktseitig benötigt wird. (Kurfer et al. 2012, S. 2)

Die Alternative zum Z-Stapeln ist das oben genannte Einzelblattstapeln. Dabei liegen alle Komponenten des Zellstapels als Einzelblätter in Magazinen vor. Diese werden in der bekannten Anordnung aufeinander gestapelt, nachdem die Einzelblätter vorher (in der Regel) mithilfe von optischen Messsystemen ausgerichtet wurden. Aufgrund des komplexen Handlings von extrem biegeschlaffen, dünnen Separatoren als Einzelblätter, welche über Elektrostatik aneinander haften können, sowie der generellen Schwierigkeit der Dopellagenvermeidung bei der Aufnahme von porösen Separatoreinzelblättern mittels Niederdruck ist das Einzelblattstapeln im Gegensatz zum Z-Falten langsamer und weniger prozesssicher, jedoch ist das Einzelblattstapelverfahren das einzige Produktionsverfahren, welches erlaubt, nicht-rechteckige Formate als Pouch-Zellen zu fertigen. Außerdem weisen Einzelblattstapel hohe Energiedichten auf, da aufgrund des Prozesses kein für die Produktfunktion unnötiges Elektroden- oder Separatormaterial in der Zelle verbaut wird. (Baumeister und Fleischer 2014, S. 5f)

Am wbk wurde ein alternativer Stapelprozess entwickelt, welcher die Vorteile des Einzelblattstapelns mit hoher Produktivität und Flexibilität verbindet. Dieses Coil2Stack genannte Verfahren verarbeitet die Elektroden und den Separator als Bahn. Nach der Ausrichtung der Elektrodenbahn werden die Elektroden genotcht, d.h. überflüssige Substratfolie wird abgetrennt, so dass eine Bahn an Elektroden mit Kontaktfähnchen übrig bleibt, siehe Abbildung 2.5. Diese Bahn wird nun auf einen Wickel aufgebracht und gefördert. Der Wickel ist segmentiert, die einzelnen Segmente können radial verfahren, wodurch der Radius des Wickels flexibel (auch während des Prozesses) einstellbar ist. Zwischen den einzelnen Segmenten befinden sich Rollmesser, welche durch Betätigung einzelne Blätter von der Bahn abtrennen. Durch den Radius des Wickels lässt sich also die Blattlänge bestimmen und flexibel einstellen. Im Anschluss wird das Einzelblatt auf einen Werkstückträger abgelegt und fixiert. Für die Bildung eines Stapels werden jeweils eine solche Anlage für Anode, Kathode und Separator benötigt,

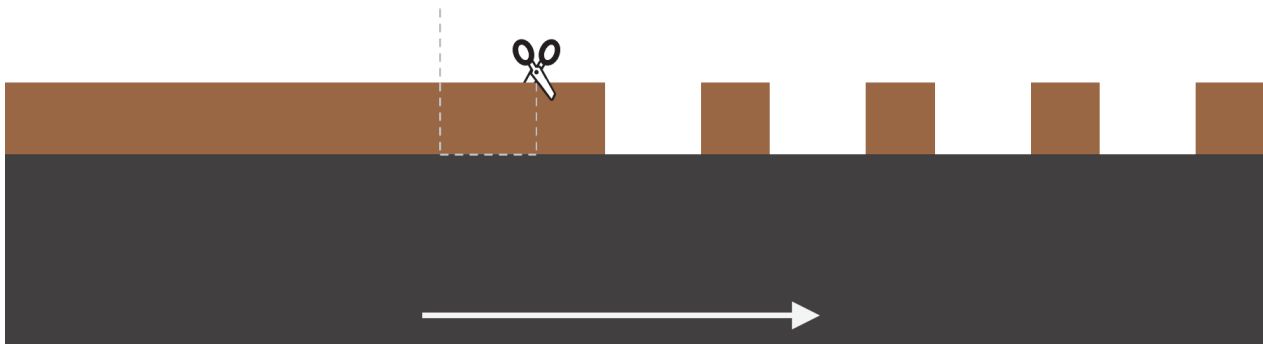


Abbildung 2.5: Prinzipdarstellung des Prozessschrittes "Notchen" in der Coil2Stack-Anlage

wobei beim Separator auf das Notchen verzichtet wird. Der Werkstückträger verfährt zwischen diesen drei Einzelanlagen, wodurch der Stapel in der bekannten Reihenfolge gebildet wird. (Weinmann et al. 2020, S. 242f)

Ein Prototyp einer solchen Einzelanlage sowie das zugehörige Anlagenschema sind in Abbildung 2.6 dargestellt. Das Notchen findet nicht in der abgebildeten Anlage statt, sondern wird in vorgeschalteten Anlagen vorgenommen.

Die relevante Qualitätsgröße beim Stapeln ist die Stapelgenauigkeit. Diese gibt den maximalen Abstand eines Punktes im Ist-Zustand zu dem Punkt im Soll-Zustand an. Durch die mögliche Überlagerung von translatorischen und rotatorischen Verschiebungen befinden sich die Punkte maximaler Verschiebung maximal weit vom Flächenmittelpunkt und dem Drehpunkt der Elektrode entfernt. Die Stapelgenauigkeit wird in der Regel über Kamerasysteme (Mono- oder Stereosystem) ermittelt. Einflüsse auf die Stapelgenauigkeit haben neben den Toleranzen der Aktorik und Bauteile vor allem die Form- und Maßtoleranzen der Elektroden. Große Unsicherheiten birgt die dreidimensionale Verformung der Elektroden beim Kalandrieren (s.o.). Beim weiteren Fertigungsprozess wird beispielsweise beim Verpacken eine Kraft auf den Stapel ausgeübt, sodass sich aufgrund der Wölbungen und Falten Verschiebungen der Elektrodenblätter ergeben. Daher ist die Stapelgenauigkeit in der fertigen Zelle oft unterschiedlich zur beim Stapelprozess gemessenen Genauigkeit. Die notwendige Stapelgenauigkeit in der fertigen Zelle wird mit $\pm 0,1-0,5$ mm angegeben. (Mayer und Fleischer 2021, S. 745f)

Sowohl Z-Stapel als auch Einzelblattstapel können laminiert werden. Dabei wird ein laminierfähiger Separator verwendet, welcher sich unter Druck und Wärme mit den

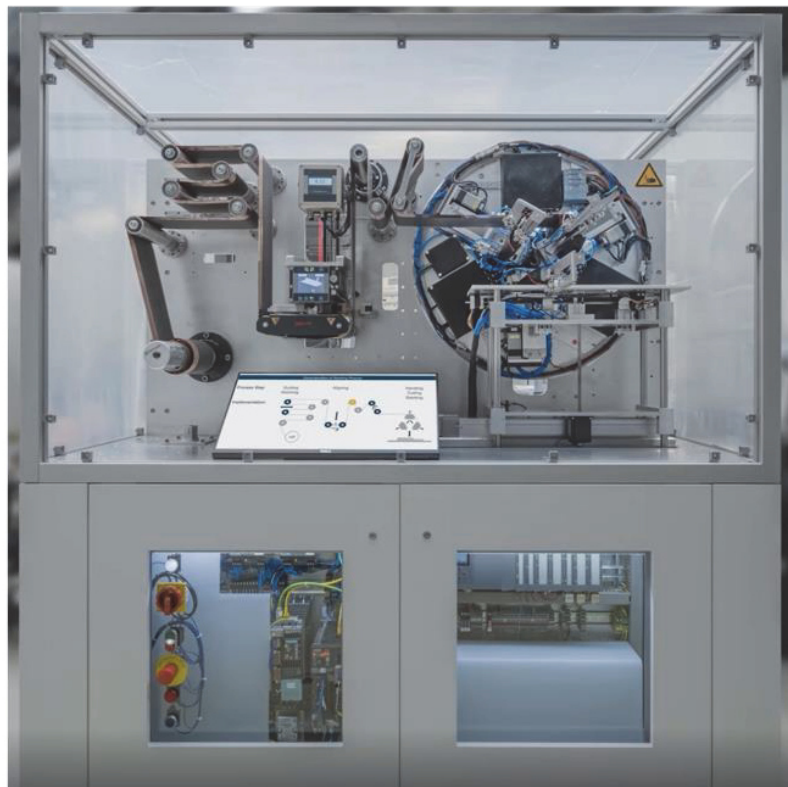
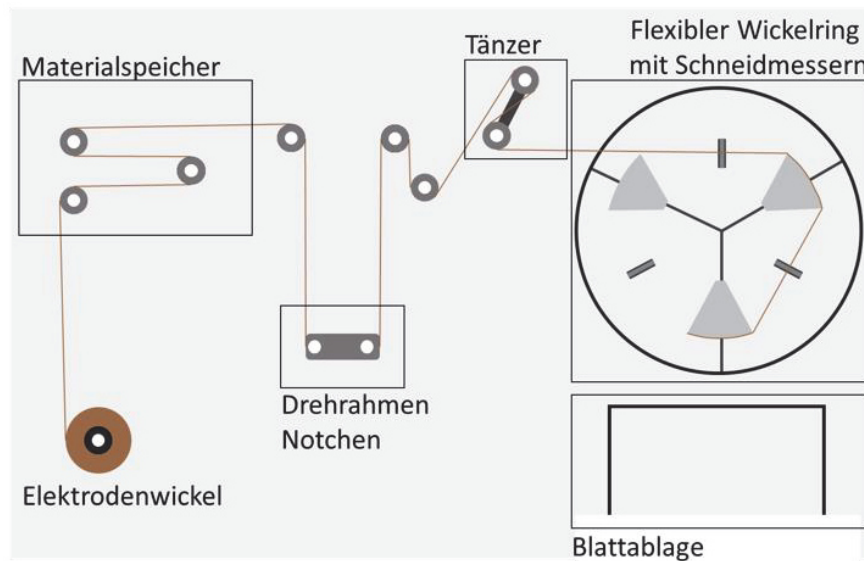


Abbildung 2.6: Coil2Stack Einzelanlage als Schema (oben) und Fotografie der Anlage (unten) nach (Weinmann et al. 2020)

Elektroden verbindet. Dadurch wird der Zellstapel zu einem integralen Bauteil, wodurch wiederum dessen Handling in den folgenden Prozessschritten erleichtert wird.

Wird der Zellstapel nicht laminiert, wird dieser in der Regel anderweitig fixiert, entweder durch die Anbringung von Klebebandstreifen oder durch Umwickeln des Stapels mit Separator.

Nach der Stapelbildung werden die Ableiterbleche an die Kontaktfähnchen der Elektroden angeschweißt. Dieser Prozess wird Kontaktieren genannt. Das Ableiterblech wird dazu auf oder unter den Kontaktfähnchen der Anoden oder Kathoden positioniert, anschließend werden alle Kontaktfähnchen mit dem Ableiterblech in einem Schweißvorgang verbunden. Das Ultraschallschweißverfahren ist dabei im industriellen Umfeld klar dominant, wobei derzeit die Vorteile von Laserschweißverfahren untersucht werden. (Grabmann et al. 2022, S. 2572f)

Beim Ultraschallschweißen werden die zu fügenden Bauteile auf dem unbeweglichen Teil des Werkzeugs, genannt Amboss, positioniert. Im Anschluss fährt der bewegliche Teil des Werkzeugs, die Sonotrode, auf die Werkstücke, sodass diese mit einer definierten Kraft zwischen Amboss und Sonotrode eingeklemmt sind. Durch das applizieren einer Ultraschallspannung auf die Sonotrode, welche teilweise aus Piezoaktoren besteht, wird diese in Ultraschallschwingung im Bereich von 40-80 kHz versetzt. Beim Übertragen der Schwingung auf die Werkstücke wird die Energie teilweise in Wärme gewandelt, so dass lokale Hotspots entstehen, die miteinander verschmelzen. Durch die Amplitude werden aber auch die Kristallgitter der Materialien teilweise ineinander geschoben, also kaltverschweißt. Der Anteil an warm- und kaltverschweißtem Material hängt dabei sehr stark von den Ultraschallparametern wie Frequenz, Anpresskraft, Amplitude und Schweißdauer ab. Die wichtigsten Qualitätsmerkmale der Kontaktierung sind die Abziehfestigkeit des Ableiterblechs sowie der elektrische Widerstand der Durchgangsverbindung. (Schäfer et al. 2020, S. 616)

Als letzter Prozessschritt der Zellassemblierung folgt die Verpackung und Versiegelung. Dabei wird der kontaktierte Zellstapel zunächst zwischen der Verpackungsfolie platziert. Die Verpackungsfolie besteht entweder aus zwei getrennten Halbschalen oder aus einer Folie, die entlang einer Kante zusammengefaltet wird. Der Vorteil bei der integralen Verpackungsfolie ist, dass diese Kante nicht mehr versiegelt werden muss, da die Faltung eine dichte Barriere darstellt. Der Nachteil daran ist, dass diese Variante nur für rechteckige Zellen ohne weiteres anwendbar ist. Nachdem der Zellstapel zwischen der Verpackungsfolie positioniert wurde, wird die Folie an insgesamt drei Seiten dicht geschlossen, sodass eine Seite für den nächsten Prozessschritt „Befüllen“ (s.u.) offen bleibt. Dabei kommen in der Regel Heiß- oder Impulssiegelbalken zum Einsatz, welche an das jeweilige Zellformat angepasst werden. Die Ableiterbleche werden durch die Verpackung nach außen geführt, daher müssen die Siegelbalken für die Ableiterseite eine entsprechende Profilierung aufweisen, da glatte Siegelbalken nur an der

dicksten Stelle der Siegelnaht, also dort, wo die Ableiterbleche durch die Verpackung geführt werden, anliegen würden. Um also einen guten thermischen Kontakt über die gesamte Länge der Siegelnaht zu erreichen, werden profilierte, an die Ableitergeometrie angepasste Siegelbalken verwendet. Damit sich die Ableiterbleche gut mit dem Siegelwerkstoff der Verpackungsfolie verbindet, ist an dieser Stelle ein sogenanntes Siegelband aus dem gleichen Werkstoff an den Ableiterblechen zu finden. In Abbildung 2.7 ist eine geschnittene Pouch-Zelle mit durchgeführtem Ableiter sowie ein beispielhafter Aufbau der Verpackungsfolie und des Zellstapels zu sehen. Die Verpackungsfolie wird als Aluminiumverbundfolie ausgeführt, das heißt, sie besteht im Kern aus einer Aluminiumfolie, welche beidseitig einfach oder mehrfach mit Kunststoff beschichtet ist. Die Aluminiumschicht dient dabei als Diffusionssperre und verhindert den Ein- und Austritt von Gasen und Feuchtigkeit, die äußere Kunststoffschicht dient als mechanischer Schutz für die Folie. Hierfür wird häufig ein Kunststoff mit hoher Härte wie beispielsweise Polyamid, Polyethylenterephthalat oder Polyethylen verwendet. Für eine bessere Haftung ist zwischen den Schichten in der Regel noch ein dünnes Haftmittel aufgetragen (Liang et al. 2014, S. 1), welches der aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abbildung 2.7 nicht dargestellt ist.

Auf der inneren Seite, der Siegelseite, wird ein niedrigschmelzender Kunststoff, in der Regel Polypropylen, verwendet. Da der Wärmeeintrag immer über die äußere Schicht zur inneren Schicht erfolgt und ein Aufschmelzen der äußeren Schicht vermieden werden muss, ist die Werkstoffauswahl so getroffen, dass eine ausreichende Differenz zwi-

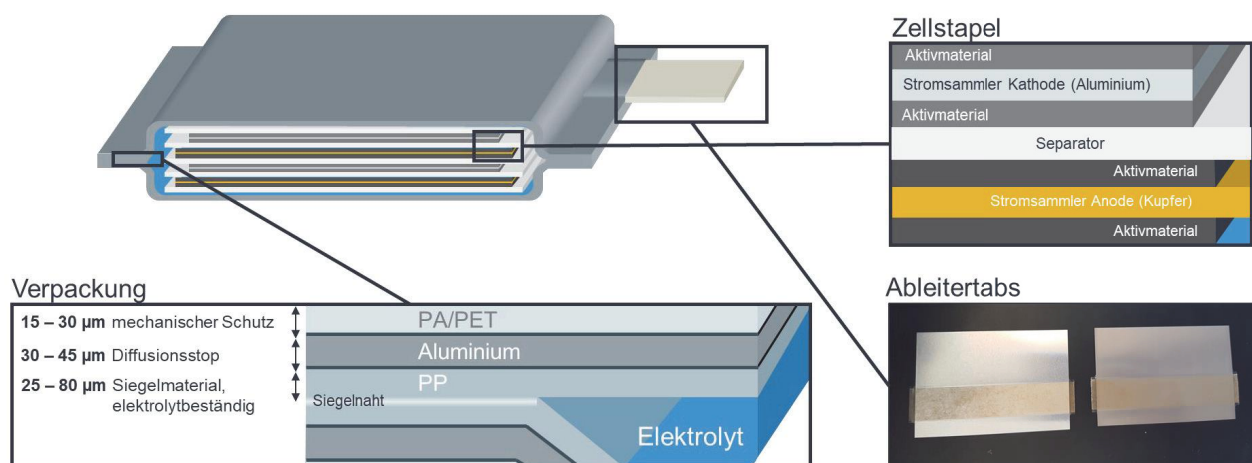


Abbildung 2.7: Darstellung einer Pouch-Zelle im Schnitt mit Verpackung, Zellstapel und Ableitertabs

schen den Schmelzpunkten der Materialien garantiert ist. Beim Siegelvorgang verbinden sich also die Polypropylenschichten der Verpackungshälften zu einem dichten Siegel. Die Prozessparameter dabei sind Siegeltemperatur, Siegelzeit und Siegeldruck, die Qualitätsparameter sind die Dichtigkeit der Naht sowie die Abziehfestigkeit der Verbindung. Näheres dazu in Kapitel 2.3.

2.1.3.3 Aktivierung

Damit der Ionenaustausch in der Zelle möglich wird, muss die Zelle mit Elektrolyt befüllt werden. Dies geschieht bei der Befüllung. Dazu wird die Pouch-Zelle zunächst in einer Vakuumkammer evakuiert, um Lufteinschlüsse zu verhindern. Anschließend wird bei gehaltenem Nahvakuum Elektrolyt über die bei der Versiegelung offen gebliebene Seite auf den Zellstapel gegeben. Anschließend wird diese Seite im Vakuum versiegelt, wobei die Siegelnaht in einigem Abstand zum Zellstapel gezogen wird. Mit der gasdichten Zelle kann nun unter normalen Umgebungsbedingungen hantiert werden. Die wichtigsten Prozessgrößen beim Befüllen sind die Durchflussmenge, die Befüllmenge und die Befüllzeit. Diese bestimmen den Qualitätsparameter der Benetzung, welcher angibt, wieviel der Elektrodenoberfläche vom Elektrolyten benetzt ist. Idealerweise beträgt die Benetzung nach dem Befüllvorgang 100%. (Weydanz et al. 2018, S. 126)

Die befüllte Zelle wird im Anschluss formiert, d.h. zum ersten Mal aufgeladen und entladen. Dazu wird die Zelle zunächst an eine Spannungsquelle angeschlossen und mit einer bestimmten, herstellerabhängigen Strategie aufgeladen. Dabei wird die Laderate, Spannung und Stromstärke variiert. Die anschließende Entladung findet durch das Anschließen eines Verbrauchers statt, wobei ebenfalls die Entladerate durch die Stromstärke variiert wird. Bei der Aktivierung finden chemische Reaktionen der Elektrodenoberfläche mit dem Elektrolyten statt. Dabei bildet sich eine Schutzschicht auf den Elektrodenoberflächen, welche eine weitere Reaktion des Elektrolyten mit dem Aktivmaterial verhindert. Diese Solid-Electrolyte-Interface (SEI) genannte Schutzschicht ist also zwingend notwendig, dass die Zelle über ihre Lebensdauer wieder aufladbar ist, andererseits darf die SEI auch nicht zu dick sein und dadurch die Ionenpermeabilität in und aus dem Aktivmaterial beschränken. Bei der Entstehung der SEI werden ebenfalls Gase freigesetzt. Diese werden mechanisch in den dafür vorgesehen Bereich der Verpackung gedrückt. Dieser Bereich ist der Zwischenraum zwischen der (üblicherweise letzten) Siegelnaht und dem Zellstapel. Im Anschluss wird eine finale Siegelnaht nah

am Zellstapel gezogen und die entstandene Gastasche wird von der Zelle abgetrennt. Mechanisch befindet sich die Zelle nun in ihrem finalen Zustand. (Pfeiffer 2019, S. 11)

Im letzten Produktionsprozess der Lithium-Ionen-Pouchzellherstellung, dem sogenannten Zyklieren, wird die Zelle mehrmals unter Variation der Spannung, Stromstärke und (Ent-)Laderate geladen und entladen, wodurch sich ihre Eigenschaften wie Kapazität, innerer Widerstand final einstellen. Die Zelle kann dann durch geeignete Messungen qualifiziert und dann verbaut werden.

2.2 Agiles Produktionssystem

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und der Stand der Technik des agilen Produktionssystems erläutert. Dazu wird zunächst in Kapitel 2.1 das Konzept eines agilen Produktionssystems im Vergleich zur klassischen Produktionslinie erläutert. In Kapitel 2.2.2 wird daraufhin eine Übersicht über bestehende Ansätze der agilen Produktion von Lithium-Ionen-Zellproduktion gegeben.

2.2.1 Konzept der agilen Produktion

Eine konventionelle Produktionslinie besteht aus mehreren Anlagen, die jeweils einen oder mehrere Produktionsprozesse ausführen. Der Materialfluss der Werkstücke läuft dabei linear vom Anfang der Linie bis zum Ende, wobei Halbzeuge und Hilfsmaterialien an den jeweiligen Anlagen hinzugefügt oder entfernt werden. Die Werkstücke werden dabei im Gesamttakt der Linie weitergegeben. Dieser Takt wird am langsamsten Prozess in der Linie (dem sogenannten Bottleneck) ausgerichtet – könnten beispielsweise 5 Zellen pro Minute gestapelt werden, jedoch 7 Zellen pro Minuten kontaktiert werden, dann wird der Takt der Anlage auf 5 Zellen pro Minute angelegt, da die Kontaktieranlage lediglich diese 5 Zellen in einer Minute verarbeiten kann. Dadurch wird ein Aufstauen der Werkstücke am Bottleneck der Produktion verhindert. Die Taktzeit wird also bei der Auslegung der Anlage festgelegt und lässt sich im Betrieb nur durch einen in der Regel aufwändigen Umbau ändern. Damit wird ein optimaler Betriebspunkt der Anlage bereits bei der Auslegung festgelegt, alle anderen Betriebspunkte sind nur weniger oder überhaupt nicht wirtschaftlich abdeckbar. (Hopp et al. 2005, S. 852)

Konventionelle Produktionslinien arbeiten dabei in aller Regel werkzeuggebunden, d.h. Handling- und Prozesswerkzeuge sind auf das jeweilige zu fertigende Produkt angepasst. Dies resultiert in einer hohen und reproduzierbaren Qualität, mindert allerdings die Flexibilität gegenüber anderen Varianten und Produkten. Soll beispielsweise auf

einer Produktionslinie für Pouch-Zellen ein anderes Format als ursprünglich vorgesehen produziert werden, so ist dies mit einem Umbau oder Austausch aller Werkzeuge verbunden, was wiederum ebenfalls einen großen Umrüstaufwand mit Anlagenausfall bedeutet. Daher wird in der Regel für jedes Produkt eine eigene Produktionslinie beschafft, was ein großes Anlageninvestment zur Folge hat.

Das agile Produktionssystem setzt im Gegensatz dazu auf die Maximierung der Wandlungsfähigkeit. Dazu muss das System skalierbar und flexibel sein. Auf diese Begriffe wird im Folgenden näher eingegangen.

Skalierbarkeit bedeutet die einfache, flexible Einstellung der Taktzeit und damit des Betriebspunktes zur schnellen Reaktion auf die Marktentwicklung. Dazu wird das Produktionssystem in sogenannte Produktionszellen aufgeteilt, welche jeweils einen oder mehrere Produktionsschritte abdecken. Diese Produktionszellen sind technisch so umgesetzt, dass diese leicht ortsveränderlich sind, beispielsweise als abgeschlossene, transportierbare Umhausung. Dadurch können mehrere dieser Produktionszellen redundant angeordnet werden, um so neben dem Gesamtdurchsatz auch das Bottleneck der Anlage zu verschieben und einzustellen. Ein entsprechend flexibler Materialfluss, der auf Änderungen der Anzahl der Produktionszellen reagieren kann, wird dabei vorausgesetzt. Die Taktzeit des Gesamtsystems wird also nicht nur durch die langsamste Prozesszeit, sondern auch durch die Anzahl der ausführenden Produktionszellen bestimmt, welche leicht veränderbar ist. So wird der Takt als Quotient aus der Prozesszeit und der Anzahl ausführender Produktionszellen für jeden Prozess bestimmt (auch „virtueller Takt“ genannt) und ist durch Hinzufügen und Wegnahme redundanter Anlagenmodule anpassbar. So wird der virtuelle Takt in jedem Prozessschritt auf den gewünschten Anlagentakt eingestellt. In Abbildung 2.8 ist das Konzept des agilen Produktionssystems mit der angedeuteten Skalierbarkeit dargestellt. Dabei werden die einzelnen Anlagen mit A abgekürzt, die Nummer im Format X.Y gibt als X den Prozessschritt, als Y die Anlagennummer für redundante Anlagen eines Prozessschrittes an.

Unter der Flexibilität wird die Möglichkeit der Anlage verstanden, verschiedene Produktvarianten (beispielsweise unterschiedliche Formate oder Materialien) ohne Werkzeugumrüstung produzieren zu können. Dabei wird jeder Prozess so ausgelegt, dass er einen gewissen Flexibilitätskorridor aufweist, also eine bestimmte Bandbreite an Produkten nur durch Programmierung oder automatisierte Umrüstung produzieren zu können.

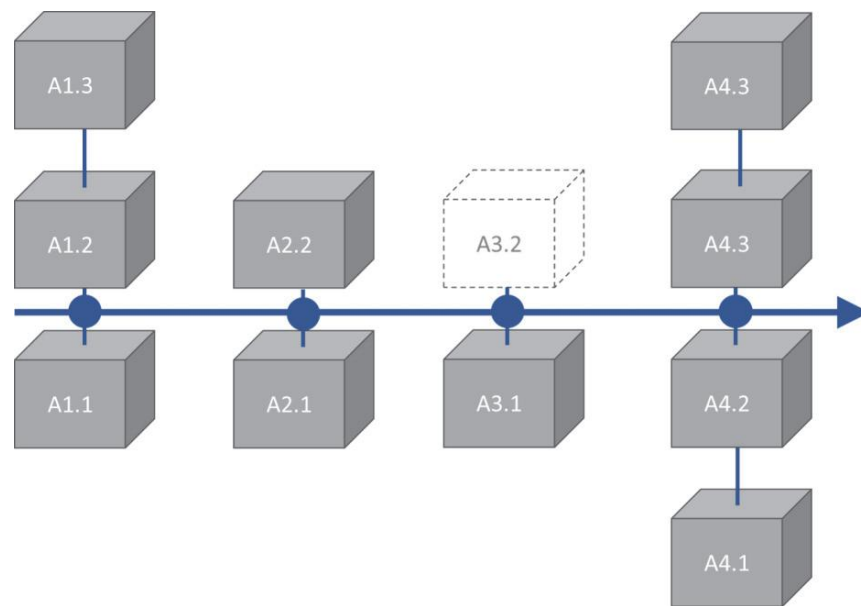


Abbildung 2.8: Grundlegendes Konzept der Verknüpfung redundanter Einzelanlagen zum agilen Produktionssystem

Wandlungsfähigkeit bezeichnet im Kontext der Produktionssysteme die Fähigkeit, sich auf verändernde Anforderungen reaktiv oder proaktiv umstellen zu können (Wiendahl 2002, S. 123). Eine genauere Definition gibt (Morales 2003) mit „Wandlungsfähigkeit kennzeichnet das Potenzial einer Fabrik, durch system- und strukturimmanente Wandlungsbefähiger, reaktiv oder proaktiv eine zielgerichtete Neu- oder Rekonfiguration der Wandlungsobjekte auf allen Systemebenen bei geringem Aufwand durchführen zu können, um die interne und externe Effizienz der Fabrik zu erhöhen oder zu erhalten (Morales 2003, S. 52).“ Dies entspricht im Kern die Übertragung des Grundgedanken von Plattformen, wie sie beispielsweise bei Automobilen eingesetzt werden, auf Produktionssysteme.

(Rauch 2013, S. 55) listet folgende Arten der Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems auf:

- Räumliche Wandlungsfähigkeit: Möglichkeit der Erweiterung und Verminderung sowie flächenbezogenen Atmungsfähigkeit
- Zeitliche Wandlungsfähigkeit: Die zeitlich langfristige, mittelfristige oder kurzfristige Reaktion auf Veränderungen.
- Organisatorische Wandlungsfähigkeit: Angleichung und Veränderung der organisatorischen und logistischen Abläufe und Prozesse.

- Technische Wandlungsfähigkeit: Umgestaltung von technischen Gebäudeeinrichtungen und Betriebsmitteln sowie der eingesetzten technologischen Prozesse.

Durch die Wandlungsfähigkeit schafft es ein agiles Produktionssystem, sich produktunabhängig zu etablieren und sich über mehrere Produkte und Produktlebenszyklen zu amortisieren. Am wbk – Institut für Produktionstechnik wird dieses Konzept neben der Anlage „AgiloBat“ für die Zellherstellung vor allem im Projekt „Wertstromkinematik“ allgemeiner umgesetzt. Diese sogenannte Wertstromkinematik bildet ein hoch wandlungsfähiges Produktionssystem (skalierbar, flexibel) (Mühlbeier et al. 2021). Dazu werden Roboterkinematiken, welche an einem Raster in der Produktionshalle angeordnet werden können, mit einer großen Auswahl an Endeffektoren kombiniert, um damit eine Vielzahl an Prozessen abbilden können. Dabei können mehrere Roboter kollaborieren, so übernimmt beispielsweise ein Roboter das Handling des Werkstücks, während andere Roboter dieses gemeinsam spanend bearbeiten. Da die serielle Kinematik der Roboter für einige Prozesse, gerade spanende Prozesse, aufgrund der relativ niedrigen Gesamtsteifigkeit nicht ausreicht, können sich auch mehrere Roboterkinematiken koppeln und so die Gesamtsteifigkeit erhöhen. (Mühlbeier et al. 2021, S. 847f).

Ein solches Produktionssystem ist vollständig wandelbar, da es durch geeignete Auswahl von Endeffektoren und Kopplung der Kinematiken für die Produktion einer sehr großen Bandbreite an Produkten einsetzbar ist.

Um die oben genannten Anforderungen zu erfüllen, wird beim agilen Produktionssystem auf eine konsequente Modularisierung gesetzt. Dabei werden einzelne Komponenten des Produktionssystems gekapselt und mit standardisierten Schnittstellen versehen, sodass diese leicht austauschbar sind. Dies gilt sowohl für mechanische, energie-technische als auch informationstechnische Schnittstellen. Durch die Modularität wird eine schnelle Umrüstung und Anpassung des Produktionssystems im Sinne der Wandlungsfähigkeit sowie zur Änderung des Flexibilitätskorridors ermöglicht, die Skalierbarkeit kann ebenfalls durch die Verwendung von Modulen erreicht werden, da die Schnittstellen zur Erweiterung/Reduzierung der Anzahl der Produktionszellen einfach umgesetzt werden kann.

2.2.2 Agile Batteriezellproduktion

Zur stückzahl-, format- und materialflexiblen Produktion von Li-Ionen-Zellen wurden die in Kapitel 2.1 genannten Anforderungen an das agile Produktionssystem auf die Zellfertigung übertragen. Dazu entstand am wbk – Institut für Produktionstechnik ein Konzept für die agile Batteriezellproduktion, welches im Folgenden näher vorgestellt wird.

Grundlage für die agile Zellproduktion bilden dabei die Produktionszellen, welche zur Skalierung der Produktivität einfach in das Produktionssystem integriert oder entfernt werden können. Da die Zellproduktion (teilweise) unter Trockenraumatmosphäre stattfinden muss und die Bereitstellung dieser, gemeinsam mit dem Beschichtungs- und Trocknungsprozess, einen wesentlichen Anteil des Energieverbrauchs ausmacht, (Maiser et al. 2016, S. 9, 24, 59) bringt es erhebliche Effizienzvorteile, diese Produktionszellen als kleine, lokal wirkende Trockenräume (sogenannte Microenvironments, auch Mini-Environments) auszuführen (Plocher et al. 2023, S. 612ff). Die Produktionszellen sind also als abgeschlossene räumliche Einheiten abzubilden, welche in geeigneter Art und Weise mit trockener Luft versorgt werden. Durch die Vollautomatisierung des Produktionssystems und der Produktionszellen wird der Eintrag von Feuchtigkeit in die Prozessumgebungsluft verhindert, was wiederum die Anforderungen an die Lufttrocknung senkt und damit weitere Energieeinsparungen ermöglicht.

Diese Produktionszellen werden mit sogenannten Prozessmodulen bestückt. Diese bilden jeweils einen oder zwei der Produktionsprozesse ab. Dabei wird die Anforderung an die Flexibilität auf dieser Ebene dadurch berücksichtigt, dass diese Prozessmodule den oben beschriebenen Flexibilitätskorridor aufweisen. Zum Verschieben dieses Flexibilitätskorridors und im Sinne der Wandlungsfähigkeit sind diese Module zur einfachen Austauschbarkeit mit geeigneten mechanischen und energietechnischen Schnittstellen sowie dezentraler Steuerungstechnik ausgestattet.

Das Material muss sich zum Transport zwischen den Produktionszellen in diffusionsdichten Transportbehältnissen befinden, um einer Befeuchtung oder sonstiger Kontamination der Aktivmaterialien während des Materialtransports vorzubeugen.

Zur Stückzahlskalierung können nun Produktionszellen sowie auch Prozessmodule redundant angeordnet werden. Dadurch verschiebt sich das Bottleneck, durch die beliebige Skalierung des Gesamtsystems wird der Output erhöht oder verringert. Dadurch ist eine schnelle Anpassung an die Marktsituation möglich, sofern genügend Produkti-

onszellen und Infrastruktur zur Verfügung steht. Es werden neue Geschäftsmodelle erschlossen, wie beispielsweise eine Shared Factory (Jiang und Li 2020, S. 287–290). Die ökonomische Betrachtung des Produktionssystems und der potentiellen neuen Geschäftsmodelle sind nicht Gegenstand dieser Arbeit und werden daher nicht genauer betrachtet. Ansätze zur Zellentwicklung für ein agiles Produktionssystem werden derzeit entwickelt (Gandert et al. 2024, S. 2ff) (Müller-Welt et al. 2023, S.1081ff)

Eine beispielhafte Darstellung des agilen Produktionssystems für Batteriezellen ist in Abbildung 2.9 gegeben.

2.3 Heißsiegeln & Alternativprozesse

Das Heißsiegeln ist ein klassischer Fügeprozess aus der Verpackungsherstellung und wird dort prozesssicher für das Verschließen von Kunststoff(verbund)folien verwendet. Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen des Heißsiegelprozesses und der Anlagentechnologie in Kapitel 2.3.1 dargestellt, bevor in Kapitel 2.3.2 alternative Füge-technologien vorgestellt und mit dem klassischen Heißsiegelprozess verglichen werden. Abschließend werden in Kapitel 2.3.3 die Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Überprüfung von Siegelnähten dargelegt.

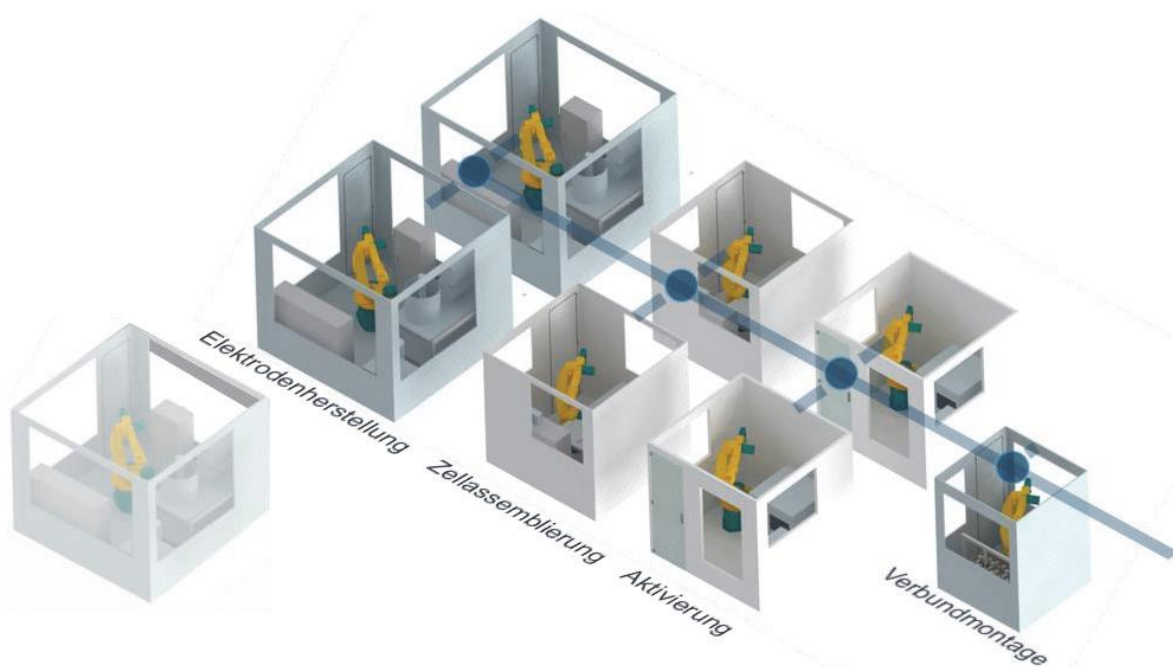


Abbildung 2.9: Beispielhafte, schematische Darstellung eines agilen Produktionssystems für Batteriezellen mit angedeuteter Skalierung durch Addition einer Roboterzelle

2.3.1 Grundlagen des Heißsiegelns

Das folgende Kapitel fasst (Hishinuma 2009) zusammen und ergänzt mit weiteren Quellen. Für die ausführliche Beschreibung der aufgeführten Grundlagen wird eine Lektüre der Primärquellen empfohlen.

Grundsätzlich wird ein Heißsiegelvorgang durch Wärmetransport von einem oder mehreren sogenannten Heißsiegelbalken in den Werkstoff durchgeführt. Dabei wird der zu fügende Werkstoff aufgeschmolzen und verbindet sich mit seinem Fügepartner. Die Wärme wird über Wärmeleitung in den Werkstoff eingebracht, die Heißsiegelbalken berühren also das Werkstück. In Abbildung 2.10 ist ein schematischer Aufbau eines Heißsiegelprozesses von Verbundfolien dargestellt. Die Wärme wird von den Balken in den Oberflächenwerkstoff mit höherem Schmelzpunkt eingeleitet, über Wärmeleitung wird die Wärme u.a. in den Siegelwerkstoff geleitet, da ein Temperaturgradient entsteht. Die Wärmeleitung durch einen homogenen Werkstoff ist gegeben durch die Wärmeleitungsgleichung

$$\dot{q}_{\vec{x}} = -\lambda(T)\nabla T(\vec{x}) \quad (\text{Formel 2-1})$$

wobei $\dot{q}_{\vec{x}}$ dem flächennormierten Wärmestrom entspricht, $\lambda(T)$ stellt den temperaturabhängigen Wärmeleitkoeffizienten dar und $\nabla T(\vec{x})$ beschreibt den Temperaturgradienten an einer beliebigen Stelle \vec{x} . Der Heißsiegelprozess kann dabei vereinfacht durch einen eindimensionalen Wärmetransport beschrieben werden, wenn die Wärmeleitung nur orthogonal zur Siegelfläche angenommen wird. Dies ist in der Regel in guter Näherung möglich, wenn dünne Folien versiegelt werden. Die Annahme von temperaturunabhängigen Wärmeleitkoeffizienten führt bei Kunststoffen, vor allem im Bereich der Schmelztemperatur, zu größeren Abweichungen in der Temperatur und wird daher nicht empfohlen.

Neben der eingetragenen Wärme dienen die Heißsiegelbalken außerdem dazu, über mechanischen Druck eine definierte Auflagefläche der Werkstoffe untereinander und jeweils mit den Siegelbalken herzustellen, um Einschlüsse in der Siegelfläche zu verhindern und einen effizienten Wärmefluss zu ermöglichen. Die Siegelfläche bezeichnet die Ebene, in der sich die Fügepartner berühren und verbinden.

Das Zusammenspiel aus Druck, Siegeltemperatur und Zeit ist ausschlaggebend für die Qualität der Siegelnaht. Ein mechanischer Druck von ca. 0,8-2 bar ist in aller Regel beim Heißsiegeln von Kunststoffen nötig, um einen guten thermischen Kontakt zwischen Siegelnaht und Werkstoffoberfläche und in der Siegelfläche zu gewährleisten

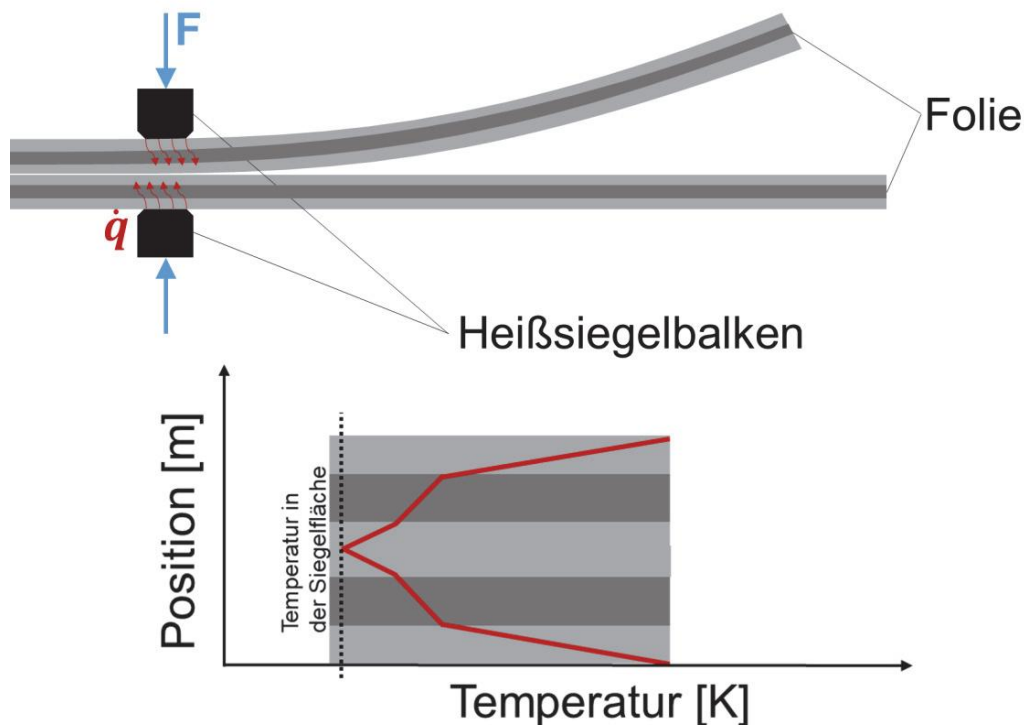


Abbildung 2.10: Schematischer Aufbau des Heißsiegelprozesses mit Siegelbalken bei einer Verbundfolie (oben) und qualitative Temperaturverteilung im Querschnitt der Verbundfolien (ohne Berücksichtigung der Heißsiegelbalken) während des Siegelprozesses (unten)

(Hishinuma 2009). Zu wenig Druck resultiert also in einem schlechten Siegelergbnis mit Luft einschlässen in der Siegelnaht und/oder nur schlecht verbundenen Siegel flächen. Wird zu viel Druck auf die Siegelnaht ausgeübt, so wird der aufgeschmolzene Werkstoff seitlich verdrängt und akkumuliert am Rand der Siegelnaht. Dies hat vor allem mechanische Nachteile, da die Siegelnaht nun dünner ist, als der Rest des Werkstoffes und damit eine potentielle Schwachstelle darstellt. Temperatur und Siegelzeit sind voneinander abhängig – d.h. je heißer die Siegeltemperatur, desto weniger Zeit wird benötigt, um die Zieltemperatur in der Siegel fläche zu erreichen. Im Umkehrschluss wird bei niedrigerer Siegeltemperatur eine längere Siegelzeit benötigt. Dabei darf die Siegeltemperatur nicht zu niedrig gewählt werden, da dann kein Aufschmelzen des Siegelwerkstoffes möglich ist. Bei zu hoher Siegeltemperatur besteht die Gefahr des Aufschmelzens des Oberflächenwerkstoffes, welcher mit den Siegelbalken in Kontakt ist, da ein großer Temperaturgradient im Werkstoff induziert wird. Das Zusammenspiel von Siegeltemperatur und –zeit ist in Abbildung 2.11 anschaulich anhand der Temperaturkurven auf der Werkstückoberfläche und der Siegel fläche dargestellt. Dabei werden zwei verschiedene Siegeltemperaturen betrachtet. Die durchgezogenen Linien

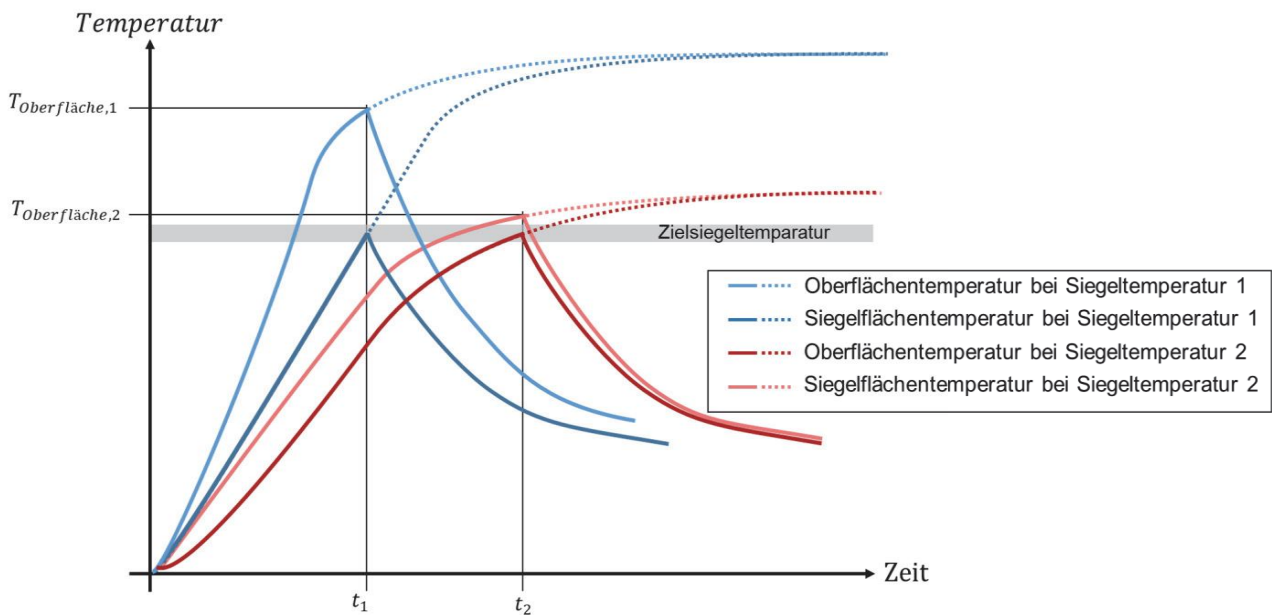


Abbildung 2.11: Temperaturkurven für verschiedene Siegeltemperaturen T_1 & T_2 , wobei $T_1 > T_2$ gilt. Dargestellt sind Oberflächen- und Siegelflächentemperaturen für den jeweiligen Siegelvorgang. Die durchgezogenen Linien beschreiben die Temperaturkurve bei Abbruch des Heizvorgangs zu den jeweiligen Zeitpunkten t_1 & t_2 , die gestrichelten Linien zeigen die Temperaturentwicklung bei andauerndem Siegelprozess. Schematische Darstellung, keine Realdaten

beschreiben dabei jeweils den Temperaturverlauf bei Unterbrechung des Siegelvorgangs zu den jeweiligen Zeitpunkten, die gestrichelte Linie zeigt auf, wie sich die Temperatur entwickeln würde, wenn der Siegelvorgang anhält.

Ein weiterer Faktor, der bei der Auslegung des Siegelprozesses berücksichtigt werden muss, ist der Wärmeübergangswiderstand zwischen Siegelbalken und Oberflächenwerkstoff. Aufgrund von Oberflächenrauheit der Werkstoffe ist ein vollständiger Kontakt dieser beiden ohne minimale Lufteinschlüsse nicht möglich. Daher muss zur korrekten Temperaturberechnung ein Temperaturübergangswiderstand R betrachtet werden (Abbot 2012). Dieser ist nur sehr schwer zu bestimmen, ein gängiger, realitätsnaher Wert ist nach (Abbot 2012) ca. $0,003 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, welcher in dieser Arbeit übernommen wird. Dieser Übergangswiderstand ist definiert als der Kehrwert des Wärmeübergangskoeffizienten, in dem vorliegenden Fall zwischen Heißsiegelbalken und Werkstückoberfläche

Die Berechnung der Oberflächentemperatur des Werkstücks kann nun also in Näherung anhand der eindimensionalen instationären Wärmestromgleichung erfolgen, wobei eine konstante Umgebungstemperatur (Heißsiegeltemperatur) und ein bekannter Wärmeübergangswiderstand (s.o.) verwendet wird.

$$T_S(x, t) = T_\infty + (T_0 - T_\infty) * [\operatorname{erf}(\mu) + e^{\tau\alpha + 2\sqrt{\tau\alpha}*\mu} * (1 - \operatorname{erf}(\sqrt{\tau\alpha} + \mu))] \quad (\text{Formel 2-2})$$

mit

$$\mu = \frac{x}{2 * \sqrt{\frac{\lambda(x, T)}{c_p(x, T) * \rho} * t}} \quad (\text{Formel 2-3})$$

und

$$\tau = \frac{\rho * c_p(x, T) * V}{\alpha * A} \quad (\text{Formel 2-4})$$

wobei T_∞ der Temperatur der Heißsiegelbalken, T_0 der Anfangstemperatur des Werkstücks, α dem Kehrwert des Übergangswiderstandes R , λ dem Wärmeleitkoeffizienten, c_p der spezifischen Wärmekapazität, V dem Volumen des Werkstücks unterhalb des Heißsiegelbalken, A der Kontaktfläche zwischen Heißsiegelbalken und Werkstück und t der Zeit seit Start des Siegelvorgangs entspricht, erf steht für die Gauß'sche Fehlerfunktion. x steht hierbei für die Koordinate orthogonal zur Siegelfläche. Durch geeignete Wahl des Koordinatensystems (Werkstückoberfläche bei $x = 0$) lässt sich die Formel 2-2 stark vereinfachen. Dies wird im Folgenden angenommen.

Nun kann der weitere Temperaturverlauf im Werkstück über die instationäre Wärmestromgleichung mit der bekannten Oberflächentemperatur als Randbedingung berechnet werden.

$$T_I(x, t) = T_S(t, x = 0) + (T_0 - T_S(t, x = 0)) * \operatorname{erf}(\mu) \quad (\text{Formel 2-5})$$

Die Berechnung mit temperaturabhängigen Wärmeleitkoeffizienten und spezifischen Wärmekapazitäten ist dabei in aller Regel nur numerisch zu lösen, ebenso der dreidimensionale Fall.

Siegelnähte werden nach (Hishinuma 2009) in zwei Kategorien eingeteilt – Peel Seals (engl. für Schäl-Nähte) und Tear Seals (engl. für Reiß-Nähte). Der Name der Kategorien beschreibt dabei die Versagensart der Siegelnaht. Bei Peel Seals sind die Siegelflächen der Werkstoffe nur durch einzelne Polymerketten verbunden, die bei Normalspannungen in der Siegelfläche reißen. Dadurch trennen sich die Folien also wieder in der Siegelfläche. Dies ist in der Lebensmittelindustrie eine häufige Art der Verpackung, da der Verbraucher diese leicht öffnen kann (Beispiel: Chipspackung). Bei Tear Seals hingegen verbinden sich die Siegelwerkstoffe beider Folien vollständig miteinander und bilden eine Einheit nach dem Abkühlen und Aushärten. Diese Siegelnähte trennen sich nicht mehr in der ursprünglichen Siegelebene und sind nur über Zerstörung der Folien

Systems ist im Vergleich zu Heißsiegelbalken deutlich geringer, weshalb die Temperatur dynamischer angepasst werden kann. Impulssiegelbalken können nach dem Siegelprozess in Kontakt mit dem Werkstoff bleiben, um die Kühlung der Siegelnaht zu beschleunigen, da die Impulssiegelbalken in der Regel schneller abkühlen als die zu versiegelnde Folie. Allerdings haben Temperaturunterschiede, Masseverteilung etc. des Werkstoffes wiederum Auswirkungen auf die lokale Temperatur des Impulssiegelbalkens, eine homogene Temperaturverteilung erfordert eine sehr genaue Anpassung des Prozess an das Werkstück. Impulssiegelbalken werden in der Regel für einfache, dünne Verpackungsfolien verwendet, welche im Anschluss an den Siegelprozess direkt weiterverarbeitet werden und wo eine aktive Kühlung der Siegelnaht sinnvoll ist.

In Abbildung 2.13 sind die schematischen Aufbauten von Heiß- und Impulssiegelanlagen dargestellt.

Beiden Arten von Siegelbalken ist gemein, dass die Kontaktfläche oft von einer Teflonschicht geschützt wird, um Anhaften von Schmelze oder Schmutz zu verhindern.

2.3.2 Prozessalternativen

Neben der Versiegelung über direkte Wärmeleitung von Siegelbalken in den Werkstoff gibt es weitere Prozessalternativen, mit welchen Kunststoff- oder Verbundfolien ebenfalls gefügt werden können. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Eine Versiegelung mittels Ultraschallschweißverfahren ist für Kunststoffe ebenfalls möglich und kommerziell verfügbar. Dabei wird, wie beim Metallschweißen mittels Ultraschall, das Material durch die Sonotrode in Schwingung versetzt, wobei lokal Reibung und dadurch Wärme entsteht. Ist die entstandene Wärmemenge ausreichend, wird das

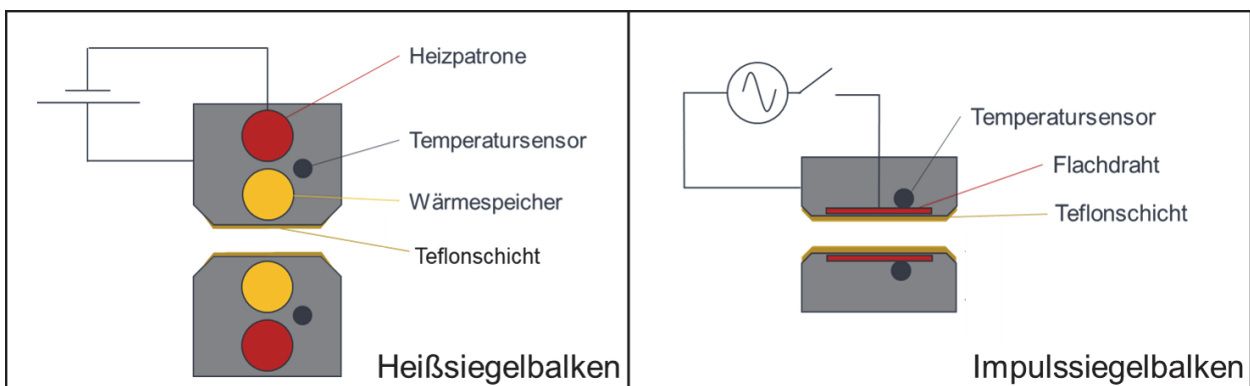


Abbildung 2.13: Aufbau von Heiß- und Impulssiegelbalken im Querschnitt mit Stromquelle nach (Hishinuma 2009, S. 31, 33)

Material aufgeschmolzen und kann sich zur Siegelnaht verbinden. (Herrmann Ultraschall GmbH 2018, S. 2)

Weiterhin existieren Verfahren, welche auf der Absorption von Laserstrahlung beruhen. Diese finden vor allem Anwendung, um (für das Laserlicht) transparente Kunststoffe auf ein das Laserlicht absorbierendes Substrat aufzuschweißen. Dabei wird das Substrat durch die Absorption der Laserenergie erhitzt, die Wärme wird durch thermischen Kontakt in den transparenten Kunststoff geleitet. So werden beide Kunststoffe in ihrer Kontaktebene aufgeschmolzen und können sich verbinden. Die *Fa. Leister* bietet beispielsweise ein *GloboWeld* genanntes Verfahren an, bei welchem über eine transparente Kugel mechanischer Druck auf die zu verbindenden Bauteile ausgeübt wird, um einen guten thermischen Kontakt sicherzustellen. Gleichzeitig wird der Laserstrahl über diese Kugel fokussiert und die Kugel kann über das Bauteil abrollen. Dadurch können, durch Verwendung an einer geeigneten flexiblen Kinematik, Siegelnähte zweidimensional sowie dreidimensional flexibel gestaltet werden. (Chen und Thielen 2004, S. 36)

In Abbildung 2.14 ist das *GloboWeld*-System dargestellt.

Neben auf Laserlicht oder Ultraschall beruhenden Verfahren sind konvektive Siegelverfahren möglich. Dabei wird aufgeheiztes Gas (in der Regel Luft) auf den Werkstoff geströmt und überträgt über konvektive Wärmeleitung Wärmeenergie auf den Werkstoff und kann diesen damit aufschmelzen. Dieser Wärmeübergang ist jedoch schwer zu regeln, da dieser von der Gasströmung abhängt, welche wiederum sehr sensibel auf Umgebungsbedingungen und Störungen reagiert. Ein thermischer Kontakt zwischen

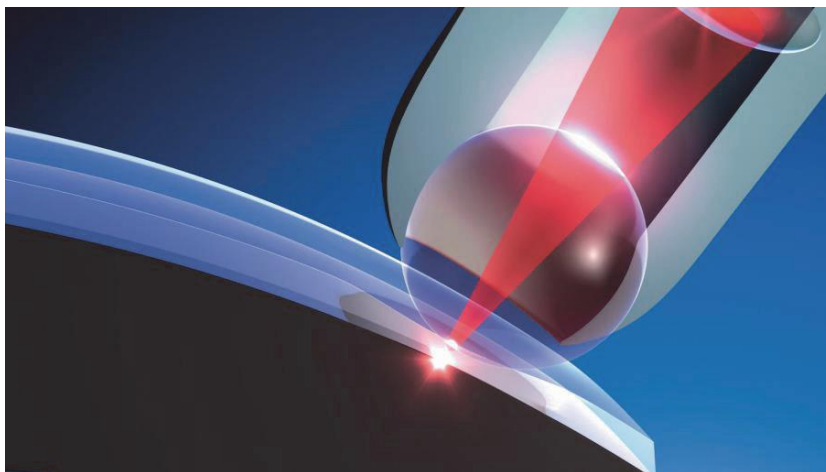


Abbildung 2.14: *Globo-Welding* Laserschweißverfahren der *Fa. Leister*, Darstellung aus (*Leister Technologies AG o.J.a*)

den Siegelwerkstoffen muss weiterhin über ein weiteres Werkzeug sichergestellt werden, welcher mechanischen Druck auf das Bauteil aufbringt. Weiterhin ist die Siegelnahtbreite nur schwer einzustellen und hängt ebenfalls stark von den Strömungsbedingungen und dadurch auch stark vom Abstand der Auslassdüse zum Bauteil ab. Aus diesen Gründen ist eine Versiegelung mittels konvektiven Verfahren hauptsächlich in der Baubranche und mit handgeführten Werkzeugen geläufig. (Leister Technologies AG o.J.)

Die Firma Watttron GmbH hat ein flexibles, auf Wärmeleitung beruhendes Verfahren entwickelt, das sogenannte Matrixheizsystem cera2heat. Dabei sind kleine, 5 mm x 5 mm große Heizschaltkreise matrixförmig im Werkzeug angeordnet. Diese Heizkreise sind einzeln ansteuerbar, wodurch in einer gewissen Auflösung sämtliche Geometrien abgebildet werden können. Diese Lösung eignet sich vor allem für flache Bauteile, da sich alle Heizschaltkreise in einer Ebene befinden. (Watttron GmbH o.J.)

2.3.3 Siegelnahtprüfung

Die Qualitätsmerkmale für eine Siegelnaht sind ihre mechanische Festigkeit sowie die Gasdichtigkeit. Beide Qualitätsmerkmale werden durch Defekte verschlechtert. Die Defekte, die in einer Siegelnaht auftreten können, werden im Folgenden kurz näher erläutert.

Ein möglicher Defekt ist das oben erwähnte Ausdünnen der Siegelnaht und die Ausbildung einer oder zweier Siegelwülste (engl. Polyball) am Rand der Siegelnaht durch Verdrängung des Siegelwerkstoffes bei zu hoch eingestelltem Siegeldruck. Dieser Defekt lässt sich leicht detektieren, in dem die Dicke der Siegelnaht und der Randgebiete überprüft werden. Auch eine optische Prüfung liefert meist eindeutige Ergebnisse. (Hishinuma 2009, S. 74f)

Die zweite Art von Defekten in Siegelnähten sind gasförmige, flüssige oder feste Einschlüsse in die Siegelnaht. Dabei entstehen Hohlstellen in der Siegelnahtgeometrie, welche vor allem im Fall von flüssigen oder gasförmigen Einschlüssen erhebliche Auswirkungen auf die Siegelnahtfestigkeit haben können. Flüssige oder feste Einschlüsse sind in jedem Fall auf Verunreinigungen der Ausgangswerkstoffe zurückzuführen, gasförmige Einschlüsse können durch Verdampfen von Kunststoffbestandteilen bei zu hohen Siegeltemperaturen oder durch Lufteinschlüsse entstehen. Lufteinschlüsse lassen sich durch einen guten Kontakt der Siegelflächen, also durch sauber aufliegende Siegelbalken sowie ausreichenden Siegeldruck vermeiden (Hishinuma 2009, S. 25). Durch

zerstörungsfreie Verfahren sind Einschlüsse nicht immer einfach detektierbar. Es gibt jedoch kommerziell verfügbare Prüfanlagen, welche die Siegelnaht mittels Sonografie abtasten und über Veränderung in der Laufzeit der Schallwellen Einschlüsse entdecken (Yamaha Fine Technologies Co., LTD o.J.).

Die Defekte sind in Abbildung 2.15 schematisch dargestellt.

Die mechanische Festigkeit wird anhand der Abziehfestigkeit der Siegelnaht bestimmt. Anhand des Versagens und der Abziehfestigkeit lässt sich auf die Art der Siegelnaht schließen. Reine Peel Seals reißen dabei in der Siegelebene auf, bei reinen Tear Seals reißt die Folie knapp vor der Siegelnaht. Mischformen können dabei vorkommen. (Hishinuma 2009, S. 17). Es hat sich die Prüfmethode des T-Peel-Tests etabliert. Diese ist in der Norm ASTM D1876-08(2015)e1 (Technical Norm ASTM D1876-08(2015)e1) festgehalten. Bei diesem Abschältest wird die Siegelnahtprobe in eine Zugprüfmaschine so eingespannt, dass die Folien durch Zugspannungen in der Siegelnaht auseinander gezogen werden. Dabei werden die dazu benötigte Kraft sowie die zurückgelegte Distanz der Einspannung gemessen.

Laut (Technical Norm ASTM D1876-08(2015)e1) wird eine Probenbreite von 15 mm festgelegt, womit die gemessene Kraft zur Vergleichbarkeit der Proben normiert wird. Die maximal gemessene Kraft vor Versagen der Siegelnaht gibt dabei die Abziehfestigkeit in der Einheit $N/15mm$ an. Ein schematischer Aufbau des T-Pull-Tests und eine beispielhafte Auswertungskurve sind in Abbildung 2.16 gezeigt. Neben Defekten, auf welche im weiteren Verlauf näher eingegangen wird, haben vor allem Werkstoffeigenschaften, Siegeltemperatur und -druck Einfluss auf die Abziehfestigkeit (Hishinuma 2009, S. 11). Dabei wird in (Hishinuma 2009) dargelegt, dass die Abhängigkeit von der

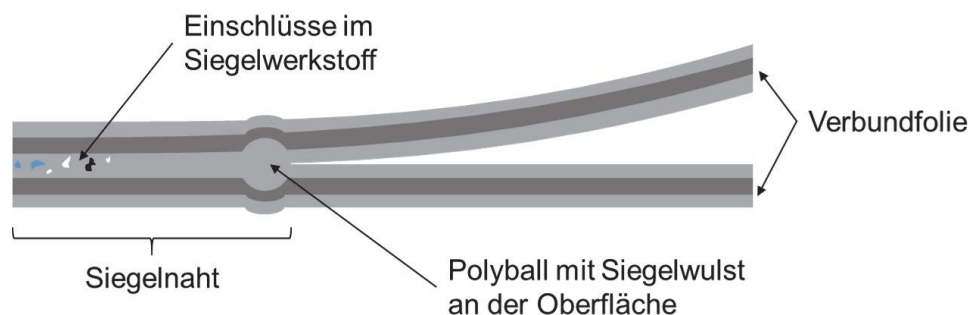


Abbildung 2.15: Schematische Darstellung einer Siegelnaht von Verbundfolien mit den zwei häufigsten Defekten. Flüssige Einschlüsse blau, feste schwarz und gasförmige weiß dargestellt

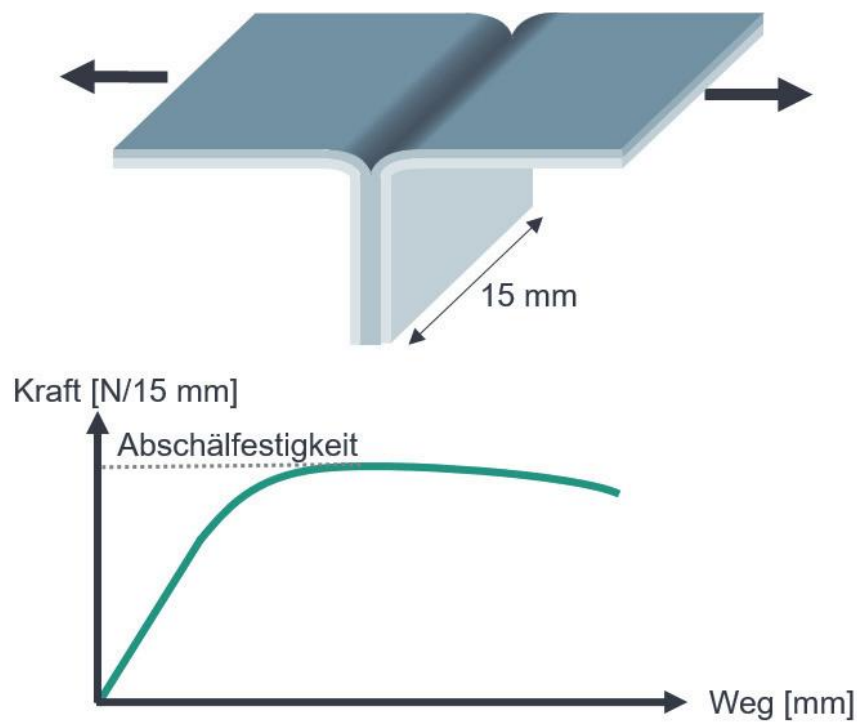


Abbildung 2.16: Schematischer Aufbau des T-Peel-Tests (oben) und beispielhafte Auswertungskurve (unten)

Siegeltemperatur ein Maximum aufweist und die Abziehfestigkeit bei weiterem Anstieg der Siegeltemperatur nach Erreichen der Mindestsiegeltemperatur nicht konstant ist. Dies wird von (Hishinuma 2009, S. 74) auf das Verdampfen von Additiven aus dem Siegelwerkstoff bei hohen Temperaturen zurückgeführt. Ein beispielhafter Verlauf der Abhängigkeit von Siegeltemperatur und Abziehfestigkeit ist in Abbildung 2.17 schematisch veranschaulicht.

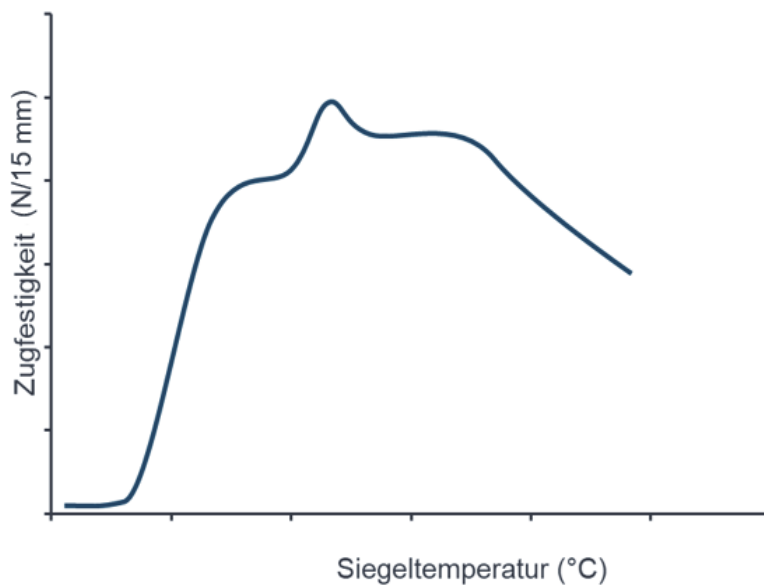


Abbildung 2.17: Beispielhafte Kurve der Zugfestigkeit über die Siegeltemperatur mit Maximum und abnehmender Abziehfestigkeit bei weiter steigender Siegeltemperatur

Das zweite Qualitätsmerkmal einer Siegelnaht ist ihre Dichtigkeit, also Durchlässigkeit für Gasmoleküle. Die Dichtigkeit wird üblicherweise als Leckrate angegeben. Die Leckrate beschreibt den Volumenstrom in oder aus dem Probebehälter in Abhängigkeit der Druckdifferenz zwischen Probengefäß und Umgebung und korreliert direkt mit der Größe der Kavität, durch welche der Gasaustausch stattfinden kann (Rottländer et al. 2016, S. 6). In der Regel wird Helium als Prüfgas benutzt, da Helium nach Wasserstoff das kleinste Atom darstellt, als Edelgas aber im Gegensatz zu Wasserstoff nicht entzündlich ist. Die Leckrate wird in $\text{mbar}\cdot\text{l/s}$ angegeben. In Tabelle 2.1 sind Leckgrößen mit dazugehörigen Leckraten für die Verbundfolie von Lithium-Ionen-Pouch-Zellen aufgeführt nach (Inficon 2018, S. 16). Für Pouch-Zellen wird eine Leckrate von $\leq 10^{-6} \text{ mbar}\cdot\text{l/s}$ gefordert (Inficon 2018, S. 15f).

Um die Dichtigkeit zu testen wird eine Druckdifferenz zwischen Probekörper und Testumgebung erzeugt. Dabei spielt es keine Rolle, in welche Richtung die Druckdifferenz anliegt. Es ist also möglich, den Probekörper zu evakuieren und die Testumgebung mit Heliumgas zu beaufschlagen, um die Menge Helium zu detektieren, welche in den Probekörper eindringt – ebenso ist es jedoch möglich, den Probekörper mit Helium zu beaufschlagen und die Umgebung zu evakuieren, um das aus dem Probekörper heraustretende Helium in der Umgebung zu quantitativ zu detektieren. Sollen die Undichtigkeiten lokalisiert werden, wird eine sogenannte Schnüffelsonde eingesetzt, die kleinste Mengen Helium qualitativ detektiert. Diese Schnüffelsonde wird am Probekörper entlanggeführt und zeigt an der entsprechenden Stelle ein Signal. Mit Schnüffelsonden ist eine Leckrate von bis zu $10^{-7} \text{ mbar}\cdot\text{l/s}$ detektierbar. Der schematische Aufbau von Dichtigkeitsprüfungen und Lecksuche mittels Schnüffelsonde ist in Abbildung 2.18 dargestellt.

Tabelle 2.1: Verschiedene Lochgrößen mit korrespondierenden Leckraten und Folgen für die Batteriezelle bei Pouch-Zellen nach (Inficon 2018, S. 16).

Max. zulässige Lochgröße [μm]	Entsprechende He-Leckrate [(mbar*I)/s]	Folgen für die Batteriezelle
1	$\sim 10^{-8}$	Aufnahme von < 80 ppm Wasser pro 10 Jahre
$\ll 1$	$< 10^{-9}$	Keine signifikante Aufnahme von Wasser
2-5	$\sim 10^{-6}$	Verblockung des Leckkanals, kein Eindringen von Feuchtigkeit, kein Austritt von Elektrolyt

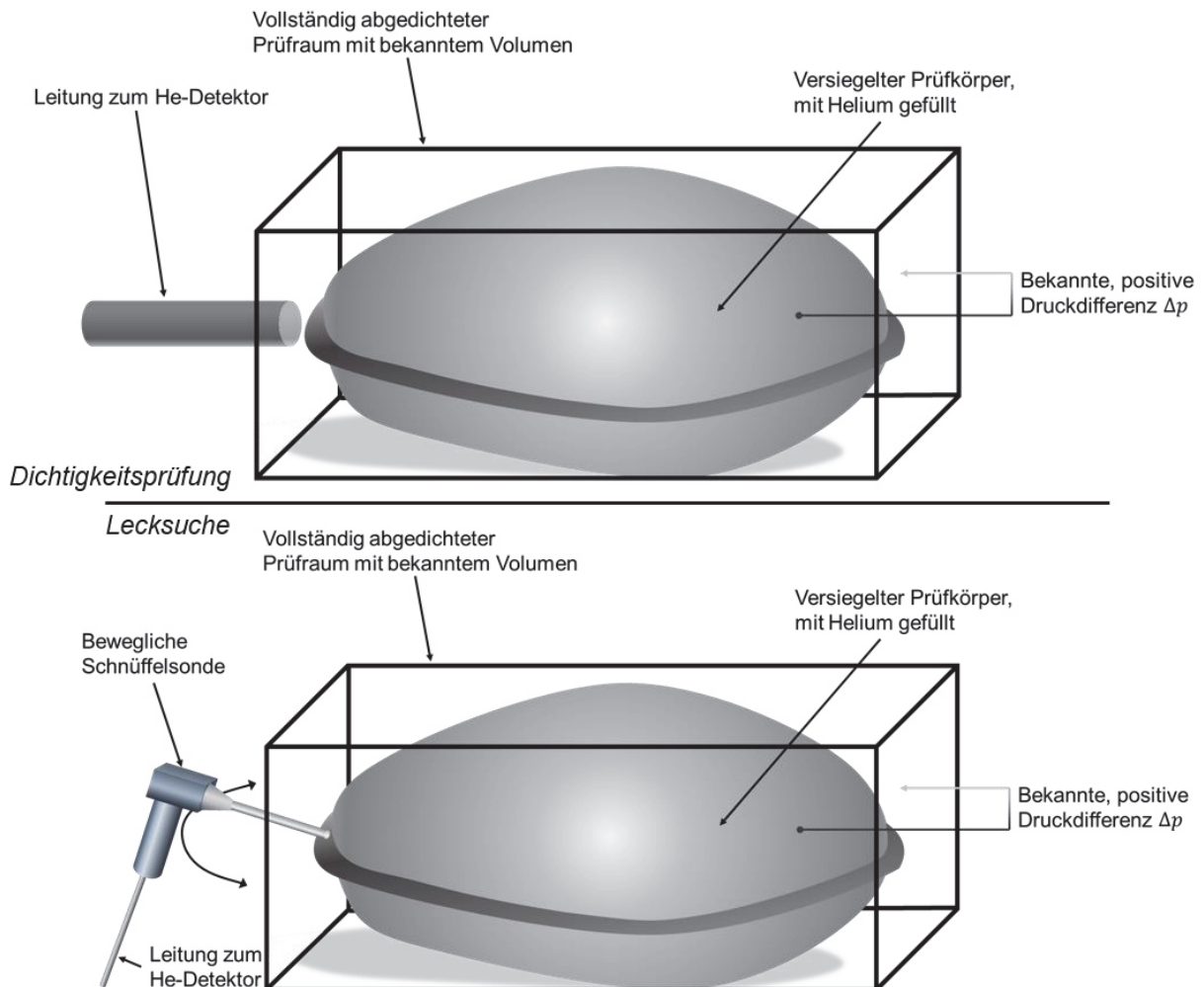


Abbildung 2.18: Skizze der Dichtigkeitsprüfung mit positiver Druckdifferenz (oben) und Lecksuche mit Schnüffelsonde (unten) mit Helium als Detektionsgas nach (Rottländer et al. 2016, S. 10)

3 Eigener Ansatz

In diesem Kapitel wird das Vorgehen der vorliegenden Dissertation zur Erreichung der in Kapitel 1.2 definierten Ziele in chronologischer Reihenfolge erläutert. Abbildung 3.1 ist der schematische Ablauf der Tätigkeiten zur Zielerreichung dargestellt.

3.1 Anforderungsanalyse

Um das flexible Produktionssystem zu definieren und die Anforderungen hinsichtlich Flexibilität, Produktivität, Qualität, Prozess- sowie Handhabungstechnik festzulegen,

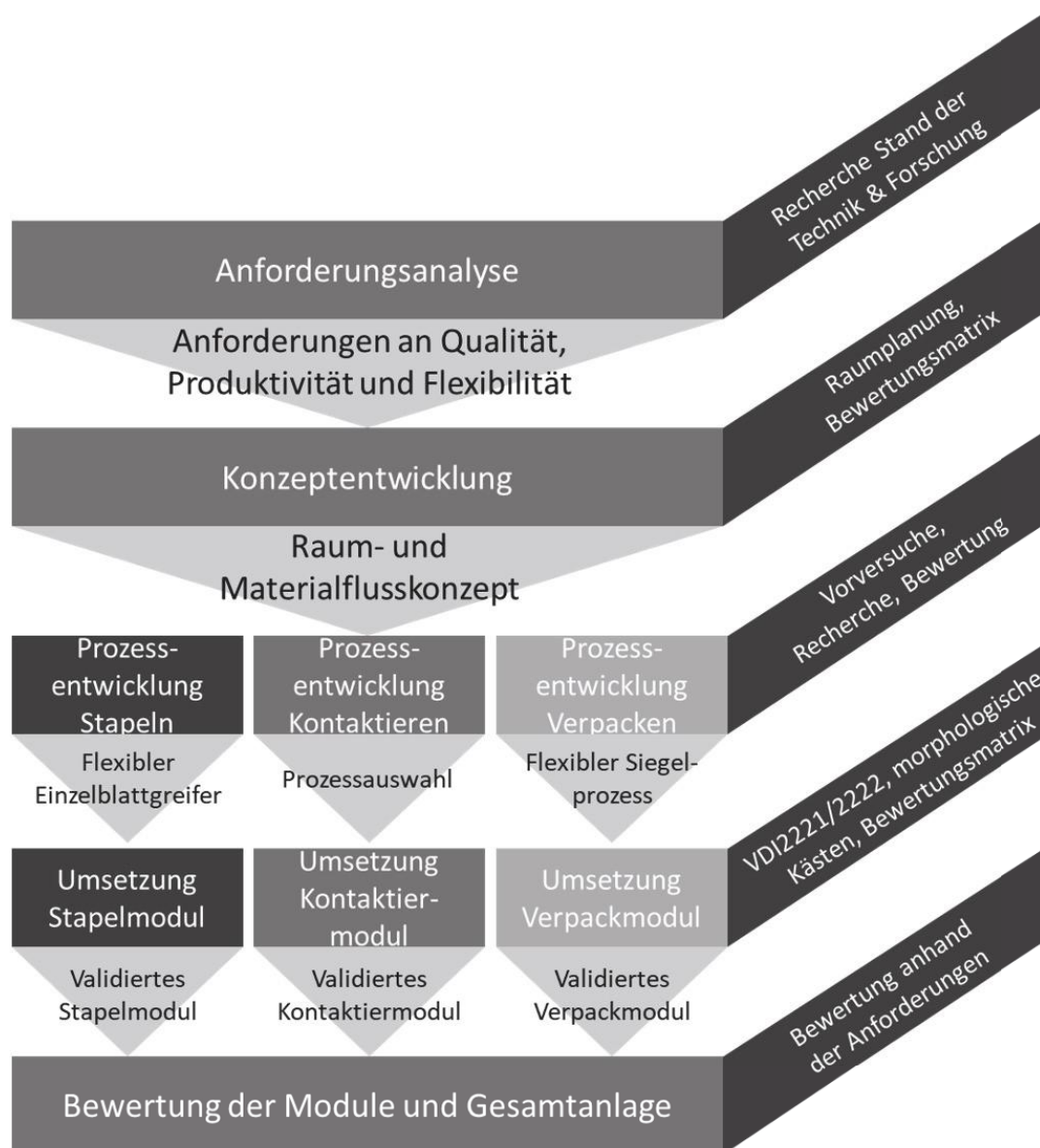


Abbildung 3.1: Grundlegendes Vorgehen zur Zielerreichung in der vorliegenden Arbeit mit verwendeten Methoden (rechts diagonal)

wird zunächst der in Kapitel 2 beschriebene Stand der Technik betrachtet. Die Anforderungen werden nach Möglichkeit aus dem Stand der Technik übernommen, ist dies aufgrund der Neuartigkeit der flexiblen Anlagentechnik nicht möglich, so werden geeignete Anforderungen abgeleitet.

Die Anforderungen an die Flexibilität werden aus am Markt verfügbaren, rechteckigen Zellen sowie neuartigen, nicht rechteckigen Zellformaten von Li-Ionen-Pouchzellen erarbeitet. Dazu werden zunächst die äußeren Abmessungen von kommerziell verfügbaren Zellen recherchiert und ein repräsentatives Zellformat für das weitere Vorgehen bestimmt.

Durch die Abbildung der Trends in Sonderformaten werden wichtige Alternativformate identifiziert und anhand derer wird ein weiteres Zellformat definiert, welches in der Entwicklung der flexiblen Anlagentechnik berücksichtigt und ohne Werkzeugwechsel gefertigt werden kann.

Es ergibt sich ein Flexibilitätskorridor, den die Anlage ohne Umrüstung abdecken muss.

Die Anforderungen hinsichtlich der Produktivität, in diesem Fall beschrieben durch die Taktzeit, werden aus dem Stand der Technik abgeleitet. Dabei soll der Stand der Technik nach Möglichkeit erreicht werden; ist dies im Rahmen des Proof of Concept, wie er in der vorliegenden Arbeit angestrebt wird, jedoch nicht realistisch, so wird die anzustrebende Taktzeit angepasst. Es besteht dabei die Möglichkeit, durch Redundanz der Produktionsmodule die Taktzeit des Produktionssystems zu erhöhen.

Die Qualitätsanforderungen für die Prozesse Einzelblattstapeln, Kontaktieren sowie Heißsiegeln werden aus dem Stand der Technik übernommen und sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit erreicht werden.

3.2 Konzeptentwicklung

Mit den erarbeiteten Anforderungen an die Prozesse und Anlagen zur flexiblen Stapelbildung, Kontaktierung und Verpackung wird ein Raum- und Materialflusskonzept für die Produktionseinheit zur flexiblen Zellausfertigung erarbeitet. Zunächst wird dabei der Flächenbedarf für ein einzelnes Produktionsmodul ermittelt. Da das hier zu entwickelnde Anlagenkonzept in der Batterieausfertigung und der Forschung keine Anwendung findet, existieren keine praktischen Beispiele, welche der Flächenbedarfsermittlung dienen können. Daher erfolgt die Ermittlung des Flächenbedarfs mit der Methode der funktionalen Flächenermittlung (s.u.). Die dabei ermittelte Fläche fließt dann als

Randbedingung in die Umsetzung der Produktionsmodule ein. Im Anschluss wird dann mittels der experimentellen Flächenermittlung der Gesamtflächenbedarf für die Produktionszelle erarbeitet, hier bildet der Flächenbedarf für die Produktionsmodule die Grundlage. Der Flächenbedarf soll dabei jeweils minimiert werden, um den Footprint der Anlage und das zu trocknende Luftvolumen in der Produktionszelle möglichst gering zu halten. Zum Abschluss der Konzeptentwicklung wird das entstandene Raumkonzept der Produktionszelle mit einem Materialflusssystem kombiniert, welche die Produktionsmodule flexibel verknüpft. Dazu werden verschiedene Konzepte mittels Nutzwertanalyse verglichen.

Die Flächenbedarfsermittlung für die einzelnen Produktionsmodule sowie für die gesamte Produktionszelle erfolgt mit den Methoden der funktionalen und experimentellen Flächenermittlung. Im folgenden Absatz wird dazu (A_Fröhlich 2019) zusammen.

Zur Flächendimensionierung in einer Produktion werden die Flächen nach VDI-Richtlinie 3644 in verschiedene Flächenarten kategorisiert. Für die Produktionsplanung von Bedeutung sind vor allem die Produktionsflächen, Lagerflächen und Transportflächen (Wiendahl, Reichardt & Nyhuis 2014, S. 493). Produktionsflächen sind dabei diejenigen Flächen, auf denen unmittelbar Fertigungs- oder Montageverfahren (Montieren, Fertigen, Prüfen und Handhaben) Anwendung finden. Lagerflächen werden zur Speicherung und zur Bereitstellung von Werkzeugen, Halbzeugen und Produkten genutzt (Wiendahl, Reichardt & Nyhuis 2014, S. 493). Transportflächen dienen dem Transport von Werkstücken oder Werkzeugen. In frühen Planungsphasen werden die Flächen durch Kennzahlen und Richtwerte auf Grundlage bekannter Anlagen- und Werkstückabmessungen bestimmt (Grundig 2018, S. 95).

Die detaillierte Flächenermittlung kann nur mit Kenntnis des Ausrüstungsbedarfs erfolgen (Grundig 2018, S. 95). Zur detaillierten Ermittlung des Flächenbedarfs gibt es die folgenden unterschiedliche Ansätze (Grundig 2018, S.95 ff.):

- Flächenfaktoren: Die Maschinengrundfläche ist die Ausgangsbasis für die Berechnung der Arbeitsplatzfläche. Die Fläche des Arbeitsplatzes wird durch die Multiplikation der Maschinengrundfläche mit einem Flächenfaktor berechnet.
- Ersatzfläche: Als Basis dient ebenfalls die Maschinengrundfläche. Bei dieser Methode werden der rechteckigen Grundfläche auf allen Seiten Flächenstreifen hinzuaddiert. Als Ergebnis wird der grobe Flächenbedarf des Arbeitsplatzes erhalten.

- experimentelle Flächenbedarfsermittlung: Der Flächenbedarf wird durch die Anordnungsvariation von zwei- oder dreidimensionalen Maschinenmodellen mit bekannten Abmaßen ermittelt. So kann eine günstige räumliche Anordnung experimentell ermittelt werden. Das Ergebnis ist ein Layout, durch Abmessen der Grundfläche im Modell kann so der Flächenbedarf ermittelt werden.
- funktionale Flächenermittlung: Auf Basis umfangreicher statistischer Untersuchungen mechanischer Werkstätten kleiner und mittelständischer Unternehmen konnte eine Gesetzmäßigkeit ermittelt werden. Voraussetzung für diese Methode ist die Kenntnis der Maschinenflächen F_{MA} . Die Summe der Maschinenflächen ergibt die Fertigungsfläche F_F . Davon ausgehend können alle weiteren Flächen durch prozentuale Zuschläge bestimmt werden: 40% von F_F entspricht der Zwischenlagerfläche F_{ZL} , weitere 40% entsprechen der Transportfläche F_T und 20% werden für Zusatzflächen F_Z benötigt. Somit ergibt sich die Werkstattfläche

$$F = F_F + F_{ZL} + F_T + F_Z = F_F * (1 + 0,4 + 0,4 + 0,2) = 2 * F_F \quad (\text{Formel 3-1})$$

als das Doppelte der Fertigungsfläche. Eine beispielhafte Anordnung ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

Da alle Verfahren zur Flächenermittlung von der Kenntnis der Maschinenabmessungen ausgehen, müssen die Verfahren für die Ermittlung des Flächenbedarfs für die Produktionsmodule modifiziert werden, da diese der Entwicklung der Produktionsmodule selbst vorausgeht und als Randbedingung mit einfließt. Als einzig geeignetes Verfahren bleibt die funktionale Flächenermittlung, wobei die Fertigungsfläche anhand der Abmessungen der Halbzeuge gut abgeschätzt werden kann.

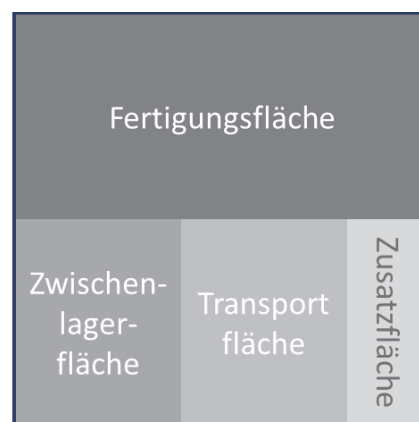


Abbildung 3.2: Beispielhafte Anordnung und Verteilung der Flächen bei der funktionalen Flächenermittlung

Mit Bekanntwerden des Flächenbedarfs für ein Produktionsmodul wird die Gesamtfläche anschließend mit einer experimentellen Flächenbedarfsermittlung durch verschiedene Kombinationen dreier Produktionsmodule ermittelt. Dabei wird berücksichtigt, dass ein geeignetes Materialflusssystem ebenfalls Platz auf der Gesamtfläche finden muss. Das finale Raumkonzept wird unter Variation des Materialflusses über eine Bewertung hinsichtlich der zu minimierenden Gesamtfläche und der Flexibilität des Materialflusses ermittelt.

3.3 Produktionsmodul- und Prozessentwicklung

Zur Entwicklung der Produktionsmodule und der dazugehörigen Prozesse wird zunächst ein Vorgehen nach VDI 2222 (VDI 1997) zum methodischen Entwickeln von Lösungsprinzipien verfolgt. Der Ablauf nach VDI 2222 ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Zunächst werden die logisch notwendigen Handhabungs- und Prozessschritte lösungsneutral für jedes Produktionsmodul festgehalten. Hierzu wird für jedes Produktionsmodul ein Funktionsplan in Anlehnung an VDI 2860 erstellt. Dabei werden die Funktionen, die die Anlage abdecken soll, lösungsneutral und symbolhaft aufgezeichnet und diese so logisch miteinander verknüpft, dass ein umsetzbarer Produktionsprozess entsteht. Anschließend werden Neben- und Hauptfunktionen identifiziert und so geclustert, dass sie technisch sinnvoll einzelnen Komponenten der Anlage zugeordnet werden können. So können beispielsweise Handhabungsschritte wie Greifen (Beispiel für Nebenfunktion) und Prozessschritte wie Positionieren (Beispiel für Hauptfunktion) ggf. von der gleichen Kinematik ausgeführt werden, weswegen diese geclustert werden und in der folgenden Bauteilauswahl nicht unabhängig betrachtet werden können.

Nachdem die Prozessschritte identifiziert worden sind, werden diese im Anschluss unter Berücksichtigung der Anforderungen an Qualität, Flexibilität und Produktivität untersucht. Dazu werden bekannte Verfahren und mögliche Alternativen im paarweisen Vergleich bewertet, wodurch für jeden Prozessschritt eine oder mehrere Verfahrensalternativen identifiziert werden können.

Durch Vorversuche werden, wenn nötig, verschiedene Prozessalternativen und Umsetzungsmöglichkeiten untersucht, bewertet und das am besten zur praktischen Umsetzung geeignetste Verfahren ausgewählt. Weiterhin werden die zur Umsetzung benötigten Grenzen der Prozessparameter wie beispielsweise Kräfte und Geschwindigkeiten in Vorversuchen identifiziert

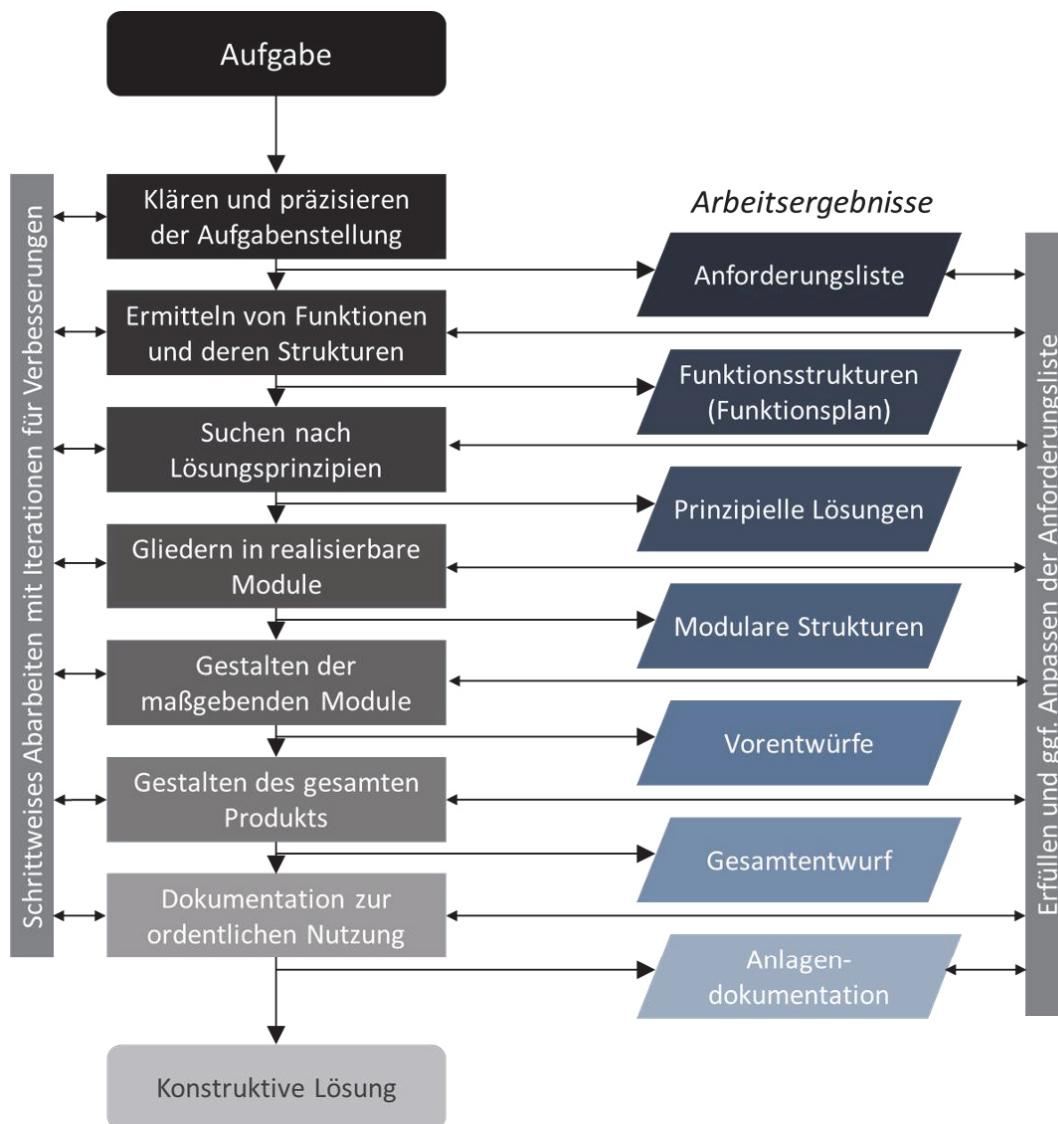


Abbildung 3.3: Grundlegendes Vorgehen nach VDI 2222 (VDI 1997)

Methoden der Modellbildung und Simulation unterstützen die Versuche bei Bedarf dabei, ein tieferes Prozessverständnis aufzubauen und nicht oder nicht ohne weiteres messbare Prozess- oder Qualitätsgrößen zu bestimmen.

3.4 Umsetzung und Validierung

Die vorher erarbeiteten Funktionspläne und die geclusterten Haupt- und Nebenfunktionen sowie die vorher erarbeitete Prozesstechnik werden zur praktischen Umsetzung in morphologischen Kästen mit technischen Umsetzungsalternativen dargestellt. Für jedes Teilsystem findet eine Nutzwertanalyse mit an den Betrachtungsfall angepassten Bewertungskriterien statt. So kann für jedes Teilsystem unabhängig eine Lösung gefunden werden. Die Lösungen werden im Anschluss zu dem jeweiligen Gesamtsystem

verknüpft. Es findet eine finale Überprüfung der Umsetzbarkeit für jedes der drei Gesamtsysteme (Stapeln, Kontaktieren und Verpacken) statt.

Es folgt die Konstruktion der Bauteile mittels Computer Aided Design (CAD) in der Software Siemens NX 11 bzw. Siemens NX 12. Gleichzeitig findet eine Auswahl der zu beschaffenden Bauteile und Komponenten statt.

Die pneumatische Auslegung der Produktionsmodule ist ebenfalls Gegenstand der Umsetzung.

Es erfolgt der Aufbau, die Programmierung und Inbetriebnahme der Produktionsmodule als unabhängige Einheiten. Im Anschluss werden die Teil- und Hauptfunktionen der Module anhand von Versuchen validiert.

Der Prozesstechnik zugrunde liegende Modelle werden ebenfalls anhand von Versuchen validiert beziehungsweise überarbeitet und an die Realität angepasst, sollte eine Validierung nicht möglich sein.

Die kurze Erläuterung der Umsetzung der Gesamtanlage hinsichtlich Steuerungstechnik, Materialfluss und Sicherheitstechnik schließt die Umsetzung der Anlage ab.

3.5 Bewertung

In abschließenden Produktionstest werden alle drei Produktionsmodule hinsichtlich ihrer Flexibilität, Qualität sowie Produktivität bewertet.

Die Produktionsmodule zur Stapelbildung sowie zur Kontaktierung werden weiterhin mit dem Materialfluss verknüpft und somit im Gesamtanlagenzusammenhang getestet.

Ein abschließender qualitativer Vergleich der neuartigen, agilen Anlagentechnik zur Zellassemblierung mit der konventionellen Zellfertigung findet statt und schließt die Arbeit ab.

4 Ergebnisse

4.1 Anforderungen

In diesem Kapitel werden die Anforderungen, welche an die zu entwickelnde, flexible Produktionsanlage hinsichtlich Flexibilität, Produktivität und Qualität gestellt werden, aus dem Stand der Technik und Marktrecherchen abgeleitet.

4.1.1 Flexibilität

Um aktuelle Zellformate und künftige Trends bei Pouch-Zellen abbilden zu können, hat eine Marktrecherche in den Branchen Elektromobilität, Power Tools sowie Consumer Electronics stattgefunden. Dabei wurden mehr als 300 Produkte mit Pouch-Zellen gefunden, Daten zum Format und zu den Dimensionen liegen für 282 Zellen vor. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass besonders im Bereich der Consumer Electronics kleinere Zellformate mit Seitenlängen von < 20 cm, in Ausnahmefällen bis zu 35 cm zum Einsatz kommen. In der Elektromobilität lässt sich

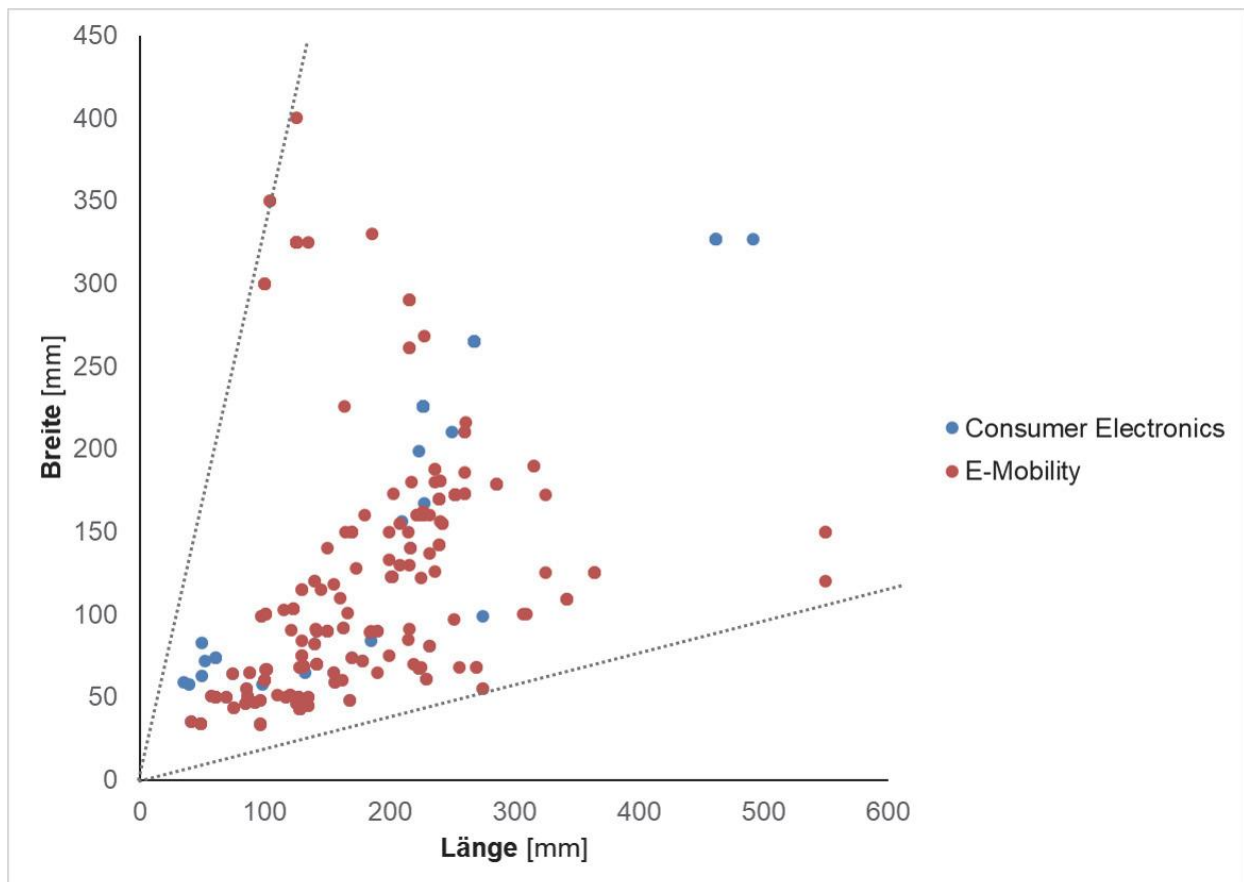


Abbildung 4.1: Breite und Länge kommerziell verwendeter Zellen im Pouch-Format

der Trend identifizieren, Zellen in ihrer Länge bzw. Breite zu maximieren, um die Anzahl an Zellen in einem Fahrzeug zu minimieren. Aus diesen Rechercheergebnissen lassen sich zwei Geraden definieren, innerhalb welcher die kommerziell verfügbaren Zellformate zu erwarten sind. Es sind Zellen mit einer Länge von bis zu 550 mm dokumentiert, dabei ist jedoch in der Regel die Breite mit ca. 150 mm deutlich kleiner. Die Folge sind Zellen mit einem hohen Aspektverhältnis von bis zu 4. Bei den Power Tools werden zum Zeitpunkt der Recherche ausschließlich zylindrische Zellen verwendet, welche nicht in Abbildung 4.1 dargestellt sind.

Eine am KIT Batterietechnikum entwickelte Pouch-Zelle mit den äußeren Abmaßen von 230 mm x 173 mm x 6 mm (ohne Ableiter) und einer Nennkapazität von 20 Ah fällt in der Marktrecherche zwischen die Zellen der Branchen Elektromobilität und Consumer Electronics. Mit diesem Zellformat existiert am KIT viel Vorerfahrung, es gibt Werkzeuge zur Herstellung der Elektroden und Separatoren in diesem Format sowie Anlagen zur Produktion der Zellen. Dies garantiert eine Verfügbarkeit der notwendigen Materialien für die in der vorliegenden Arbeit geplanten Versuche. Aus den oben genannten Gründen wird dieses KIT-Zellformat als Ausgangsformat für die weitere Arbeit dienen. In Abbildung 4.2 wird eine maßstabsgetreue Darstellung der KIT-Zelle gezeigt.

Als weiteres Zellformat ergibt sich eine Ableitung aus dem KIT-Zellformat im Hinblick auf bekannte, nicht rechteckige Formate. Diese nicht rechteckigen Formate sind bisher Nischenprodukte und kommen aufgrund der unflexiblen Produktionsmittel selten vor.

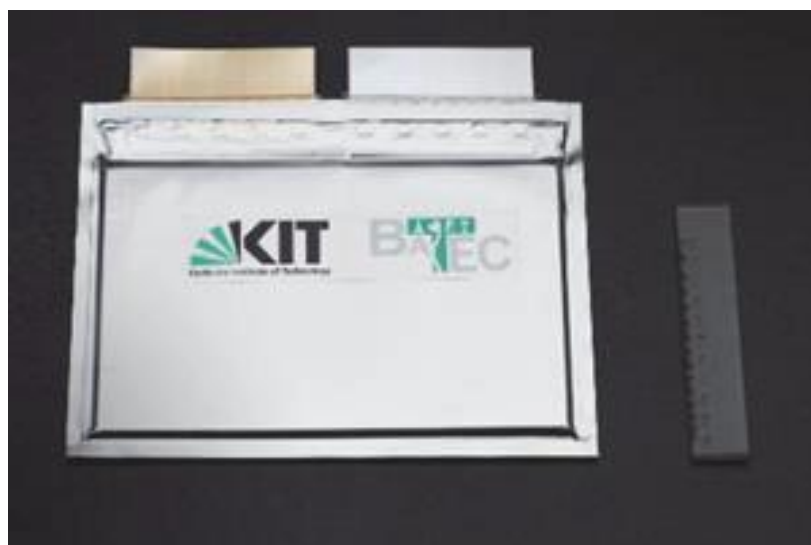


Abbildung 4.2: KIT-Zelle des Batterietechnikums
(BaTec) am KIT

Bekannte Formate sind L-förmige Formate (Apple iPhone XS ¹, Lenovo Laptop²) sowie hexagonale Formen (LG Chem Smartwatch Battery³). Diese sind mit Beispielen in Abbildung 4.3 dargestellt. Ausgehend von der Tatsache, dass alle kommerziell verfügbaren Zellen gerade Kanten aufweisen, wird das in der vorliegenden Arbeit zu verwendende Sonderformat ebenfalls mit geraden Kanten konzipiert.

Als einfache Konfiguration des erprobten KIT-Zellformats wird daher eine trapezförmige Abwandlung dessen als Sonderformat definiert. Die Flankenwinkel betragen dabei 12°. Eine Fotografie der Trapezzelle mit den zugehörigen Elektroden ist in Abbildung 2.3 zu sehen. Durch die Ähnlichkeit der Zellformate ist eine Erprobung der Zellen mit den am KIT vorhandenen Anlagen gewährleistet, gleichzeitig kann die Flexibilität der Anlage beispielhaft demonstriert werden. Wichtig ist zu erwähnen, dass an die in den folgenden Unterkapiteln vorgestellten Anlagen die Anforderung gestellt wird, beide oben genannte Zellformate ohne Werkzeugwechsel fertigen zu können, die Anlagen werden jedoch so flexibel gestaltet, dass eine Bandbreite an verschiedenen Formaten gefertigt werden kann. Lediglich die maximalen Abmaße der Zelle orientieren sich an den definierten Zellformaten.

Es wird folgender Flexibilitätskorridor bezüglich Zellformat für alle zu entwickelnden Anlagen (Stapelmodul, Kontaktiermodul, Verpackmodul) definiert:

- KIT-Zelle fertigbar, definiert Maximalfläche der Zelle und der Einzelblätter (Maximum)
- Verarbeitung von Einzelblättern und Zellen mit einer Fläche von mindestens 60 % des KIT-Formats ohne Werkzeugwechsel, dabei weisen die Seitenlängen jeweils mindestens 50 % der Seitenlängen des KIT-Zellformats auf (Minimum)
- Verarbeitung des trapezoidalen Sonderformats ohne Werkzeugwechsel



Abbildung 4.3: Verschiedene, nicht-rechteckige Pouch-Zellen, die in kommerziellen Produkten eingesetzt werden. Bildquellen siehe Fußnoten

¹ https://media.wired.com/photos/5ba91f8191b99b2d21c6f73b/master/pass/ifixit_iphonexs.jpg

² <https://www.storeshoppe.com/products/lenovo-l16l4pb2-l16c4pb2-l16m4pb2-ideapad-720s-laptop-battery#>

³ https://www.lgchem.com/asset/images/cyber/kr/cyber/new_timeline/2010y_img_5.png

Jeweils zuletzt überprüft jeweils am 23.06.2023

Zu den im Rahmen der Recherche ermittelten Zellen wurde neben Format, Bauart und Branche auch das Aktivmaterial der Kathode festgehalten. Etwa 43% aller erfassten Zellen nutzen ein auf NMC basierendes Kathodenmaterial. Der Trend zu nickelreicheren und kobaltärmeren NMC-Materialien wird vor allem durch die hohen Stückzahlen der Elektromobilitätsbranche gefördert. Durch die gute Verfügbarkeit von NMC und die breite Verwendung dessen in kommerziellen Batteriezellen werden für die Materialflexibilität der Stapelanlage, auf welche das Aktivmaterial der Kathode einzig Einfluss hat, folgende Anforderungen gestellt:

Einzelblätter mit einem Aktivmaterial aus NMC111 sowie NMC622 werden ohne Werkzeugwechsel bis zu einer Beschichtungsdicke von 150 μm sicher verarbeitet.

4.1.2 Produktivität

Die Produktivitätsanforderungen an die Anlagenmodule wird aus dem Stand der Technik sowie der Erfahrung des Autors mit vorhandenen Laboranlagen abgeleitet. Diese sind im Folgenden jeweils für die relevanten Produktionsmodule und den jeweiligen Prozess aufgelistet.

Einzelblattstapelmodul

In (Schröder et al. 2016, S. 642) wird eine Stapelgeschwindigkeit von 2,5 Sekunden pro Elektrodenblatt beim Z-Stapeln als Stand der Technik vorgegeben. Anlagenhersteller geben auf Anfrage an, mittlerweile Geschwindigkeiten von bis zu 0,7 Sekunden pro Blatt zu erreichen, eine schriftliche Quelle ist hierzu nicht aufzufinden. (Heimes et al. 2023, S. 17) geben eine Stapelgeschwindigkeit von <1 Sekunde pro Blatt beim Einzelblattstapeln an. Die Erreichung von niedrigen Stapelgeschwindigkeiten zwischen 1-2 Sekunden bedarf, neben einer entsprechenden konstruktiven Auslegung, einer aufwendigen Programm- und Steuerungsoptimierung der Anlage. Weiterhin sind diese Anlagen auf einen Zelltypen und somit auf exakt eine Einzelblattgeometrie optimiert. Dieser Grad an Optimierung ist bei der hier zu entwickelnden neuartigen Prozess- und Anlagentechnik nicht umzusetzen und bedarf weiterer Forschung und Entwicklung nach der Etablierung des flexiblen Stapelprozesses. Die Auslegung der Aktoren der Anlage auf Stapelgeschwindigkeiten von 1 Sekunde pro Blatt wird in dieser Arbeit jedoch umgesetzt, sodass die Anlage zu diesen Stapelgeschwindigkeiten fähig ist. Um im Bereich des industriellen Standards zu bleiben, wird eine Taktzeit von 3,5 Sekunden pro Blatt (Elektrode oder Separator) als realistisch angesehen.

Kontaktiermodul

Beim Kontaktieren wird eine Prozesszeit von $< 1,0$ Sekunde pro Ableitertab angestrebt. Dies ergibt sich aus der Erfahrung mit der Kontaktieranlage des Batterietechnikums des KIT (BaTec), wo ein Schweißvorgang ca. 0,8 Sekunden dauert. Es gibt keine schriftliche Quelle, welche eine wesentlich schnellere Schweißzeit belegt, daher wird der bekannte Prozess im BaTec als Stand der Technik angenommen.

Verpackmodul

Für die Verpackung von Lithium-Ionen-Pouch-Zellen existieren ebenfalls keine verlässlichen Angaben zur Taktzeit in der Literatur. (Jang und Ahn 2017, S. 155) beschreibt einen Siegelprozess mit einer Dauer von 3-4 Sekunden mit anschließendem Abkühlen von ca. 5-6 Sekunden. Am BaTec des KIT wird für das Versiegeln einer Seite insgesamt ebenfalls ca. 7 Sekunden benötigt, die längste Seite der Zelle hat in etwa eine Länge von 200 mm. Da am BaTec jede Seite einzeln versiegelt wird und insgesamt drei Seiten der rechteckigen Zelle zu versiegeln sind, ergibt sich eine Prozesszeit von 21 Sekunden. Wird ein auf das Zellformat angepasstes Werkzeug verwendet, kann die gesamte Zelle in einem Prozess gesiegelt werden, woraus sich eine Prozesszeit von 7-10 Sekunden ergibt. Da die flexible Versiegelung auf angepasste Werkzeuge verzichtet und die Länge einer Kante somit Einfluss auf die Prozesszeit haben kann, wird die Anforderung für die Taktzeit wie folgt abgeleitet: Eine 200 mm lange Kante einer rechteckigen Zelle muss innerhalb von 10 Sekunden vollständig versiegelt werden können.

4.1.3 Qualität

Die Qualitätsanforderungen an die Prozesse und Anlagen werden, wie die Anforderungen an Produktivität in Kapitel 4.1.2, aus dem Stand der Technik abgeleitet. Nachfolgend sind die Qualitätsanforderungen für jedes Produktionsmodul und dessen Prozess aufgelistet.

Einzelblattstapelmodul

Wie in Kapitel 2.1.3.2 beschrieben, wird allgemein von einer zulässigen Positionstoleranz von bis zu $\pm 0,5$ mm der Eckpunkte der Einzelblätter gegenüber den jeweiligen Nennablageposition im fertigen Produkt ausgegangen. Diese Anforderung wird für die Einzelblattstapelbildung in der vorliegenden Arbeit übernommen. Da weitere Verschie-

bungen der Einzelblätter im weiteren Produktionsverlauf nach der Stapelbildung möglich sind, sind die Anforderungen an den Stapelprozess höher. Hier wird in Übereinstimmung mit (Baumeister 2017) eine Genauigkeit von $\pm 0,2$ mm festgelegt.

Kontaktiermodul

Die Qualität der Schweißnaht zwischen Ableitertab und Stromsammelfolie(n) lässt sich anhand der Abziehfestigkeit und des Übergangswiderstandes beurteilen, wobei beide Größen in der Regel negativ korrelieren, d.h. eine höhere Abziehfestigkeit bringt einen niedrigeren Übergangswiderstand mit sich, da eine bessere Verbindung beider Materialien erreicht wird. Aus Vorversuchen mit am BaTec kontaktierten Zellstapeln ergab sich eine Mindestabziehfestigkeit von 30 N sowohl bei Anoden- als auch Kathodenableiter bei den am BaTec eingesetzten Produktionsparameter. Zellen, welche mit diesem Parameterset seit Jahren gefertigt werden, weisen ebenfalls einen ausreichend niedrigen Übergangswiderstand auf. Daher wird für als einzige Qualitätsanforderung an den Kontaktierprozess gestellt, dass die Schweißnaht eine Abziehfestigkeit von min. 30 N aufweisen muss.

Verpackmodul

Für die Verpackungssiegelnähte von Lithium-Ionen-Pouches gilt, wie in Kapitel 2.3.3 bereits erwähnt, eine Dichtigkeitsanforderung von einer Leckrate $< 10^{-6}$ mbar³/l/s. Um mechanische Integrität der Siegelnaht gewährleisten zu können, ist es weiterhin wichtig, ein sog. Tear Seal (siehe Kapitel 2.3.1) zu erreichen, ein Peel Seal ist für die Anwendung in Lithium-Ionen-Batteriezellen nicht zulässig. Dies lässt sich mit dem normierten Abziehtest, dem T-Peel-Test (siehe Kapitel 2.3.3) überprüfen, indem eine Mindestabziehfestigkeit definiert wird. In (Guo und Fan 2016, S. 4) und in (Zeng et al. 2018, S. 12) werden Abziehfestigkeiten von 40-126 N/15 mm erreicht, in einem Einzelfall werden ca. 150 N/15 mm erreicht (Guo und Fan 2016, S. 5). Dabei wurden die Siegelparameter und das Folienmaterial (Guo und Fan 2016) bzw. Siegelparameter und Molekülorientierung des Siegelmaterials (Zeng et al. 2018) variiert. In einem Datenblatt für Pouch-Folie wird eine Nennfestigkeit von 90 N/15 mm angegeben (Dai Nippon Printing Co., Ltd. 2012). Festhalten lässt sich also eine Mindestabziehfestigkeit von ca. 40 N/15 mm, welche von dem in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Verpackmodul erreicht werden muss.

In Tabelle 4.1 ist eine Übersicht über alle Anforderungen an die jeweiligen Produktionsmodule gegeben.

Tabelle 4.1: Übersicht über die Anforderungen, welche für die Produktionsmodule und Prozesse definiert wurden

	Stapeln	Kontaktieren	Verpacken
Flexibilität	<ul style="list-style-type: none"> KIT-Zelle fertigbar Verarbeitung von Einzelblättern mit einer Fläche von mindestens 60 % des KIT-Formats, jeweils mindestens 50 % der Seitenlängen des KIT-Zellformats auf (Minimum) Verarbeitung des trapezoidalen Sonderformats ohne Werkzeugwechsel 	nicht zutreffend	<ul style="list-style-type: none"> KIT-Zelle fertigbar Verarbeitung von Zellen mit einer Fläche von mindestens 60 % des KIT-Formats, jeweils mindestens 50 % der Seitenlängen des KIT-Zellformats auf (Minimum) Verarbeitung des trapezoidalen Sonderformats ohne Werkzeugwechsel
Produktivität	5 Sek. / Blatt Ablagegeschwindigkeit	Prozessgeschwindigkeit < 1 Sek.	10 Sek. / 200 mm Kante
Qualität	Stapelgenauigkeit $\pm 0,2$ mm	Mindestabziehfestigkeit von 30 N	<ul style="list-style-type: none"> Leckrate $< 10^{-6} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$ Mindestabziehfestigkeit ca. 40 N/15 mm

4.2 Raum- und Materialflusskonzept

Zur räumlichen Auslegung und Konfiguration der Gesamtanlage wird zunächst in Kapitel 4.2.1 der Flächenbedarf für ein einzelnes Produktionsmodul ermittelt. Dies dient als Grundlage, um im Anschluss das Gesamtraumkonzept zu erarbeiten (Kapitel 4.2.2). Die genannten Kapitel basieren auf der Ausarbeitung von (A_Fröhlich 2019). Abschließend wird das Raumkonzept mit einer Materialflusslösung ergänzt, die Auswahl derer ist Gegenstand von Kapitel 4.2.3.

4.2.1 Flächenbedarf Produktionsmodul

Um den Flächenbedarf eines Produktionsmoduls zu ermitteln, wird auf die Methode der funktionalen Flächenermittlung zurückgegriffen (siehe Kapitel 3.2). Da die bereitgestellte Fläche aufgrund der Austauschbarkeit der Produktionsmodule für jedes Modul gleich sein muss, genügt es, den maximalen Flächenbedarf der Module Stapeln, Kontaktieren und Verpacken zu ermitteln. Dieser Flächenbedarf gilt dann für sämtliche Produktionsmodule, welcher als Randbedingung übernommen wird. Dadurch wird die Austauschbarkeit der Produktionsmodule in der Gesamtanlage, also der Produktionszelle, gewährleistet.

Nach der funktionalen Flächenermittlung ergibt sich die Produktionsfläche als das zweifache der Funktionsfläche. Die Funktionsfläche basiert in diesem Fall auf dem Warenträger, welcher die Halbzeuge der Zelle im jeweiligen Modul platziert. Als zentrales, zu fertigendes Produkt ist also die Maximalfläche der Zelle zuzüglich 10 cm pro Seite als Reserve für Aktorik, Sensorik etc. für den Warenträger eine gute und realistische Ausgangsbasis für die Flächenbedarfsermittlung. Als größte zu fertigende Zelle dient das KIT-Zellformat als Grundlage für die Berechnung. Die Verpackungsfolie für das KIT-Format hat die Abmaße 45 cm x 45 cm. Für die aus der Verpackungsfolie geführten Ableiter werden weitere 5 cm auf die Länge des Werkstücks addiert. Wird nun die oben genannte Reserve von 10 cm pro Seite berücksichtigt, ergibt sich die Fläche des Werkstückträgers zu 60 x 55 cm.

Da nun die Fertigungsfläche F_F sowie deren Kantenlängen bekannt sind und die Gesamtfläche dem doppelten der Fertigungsfläche entspricht, ergibt sich der Flächenbedarf je Modul zu

$$F = A * B = 2 * F_F = 2 * (60 \text{ cm} * 55 \text{ cm}) = 6.600 \text{ cm}^2$$

Die Kantenlänge A wird auf 110 cm festgelegt. Dadurch ergibt sich die Kantenlänge B zu $B = 6600 \text{ cm}^2 / 110 \text{ cm} = 60 \text{ cm}$. Damit ist die maximale Grundfläche für die Produktionsmodule festgelegt. Um die Möglichkeit des Betriebs der Produktionsmodule in jeglichen Räumen zu gewährleisten, wird eine Höhenbeschränkung für die Module von ca. 200 cm definiert.

In Tabelle 4.2 ist eine Übersicht über die ermittelten Abmaße gegeben.

Tabelle 4.2: Übersicht über die Abmaße der Produktionsmodule und den zugrundeliegenden Halbzeugen

	Länge [cm]	Breite [cm]	Höhe [cm]
Verpackungsfolie	45	45	-
Warenträger	60	55	-
Stapelmodul	110	60	200
Kontaktiermodul	110	60	200
Verpackmodul	110	60	200

4.2.2 Gesamtraumkonzept

Mit den aus Kapitel 4.2.1 bekannten Maximalmaße der Produktionsmodule kann nun unter Berücksichtigung weiterer Flächen wie Lagerflächen und Bauraum für das Materialtransportsystem ein Gesamtraumkonzept abgeleitet werden. Dazu kommt die experimentelle Flächenbedarfsermittlung (siehe Kapitel 3.2) zum Einsatz.

Zur Abschätzung der Lagerfläche genügt eine einfache Betrachtung der gelagerten Güter. Diese setzen sich zusammen aus den jeweiligen Magazinen für Anoden-, Kathoden-, Separator- sowie Verpackungsfolienblätter. Die Größe eines Magazins lässt sich leicht über die Blattgröße abschätzen. Da sich Anoden-, Kathoden- und Separatorblätter nur um maximal 4 mm in der Kantenlänge unterscheiden, werden für alle 3 Magazine die gleichen Abmaße basierend auf dem Anodenblatt angenommen. Das Separatorblatt ist zwar zwingend größer als die Aktivmaterialfläche des Anodenblatts, dabei muss jedoch das Ableiterföhnchen am Anodenblatt berücksichtigt werden. Daher bildet das Anodenblatt die Grundlage für die Bestimmung der Magazinabmaße. Die maximalen Maße eines Anodenblattes ergeben sich damit zu 212 mm x 166 mm. Die Magazinabmaße werden auf dieser Grundlage mit der funktionalen Flächenermittlung bestimmt und ergeben sich zu 250 mm x 280 mm.

Für das Magazin der Verpackungsfolienblätter ergibt sich aus den Abmaßen der Verpackungsfolie von 450 mm x 450 mm ebenfalls unter Anwendung der funktionalen Flächenermittlung eine Grundfläche von 630 mm x 630 mm.

Da nicht geplant ist, Verpackungsfolienmagazine und Elektroden- bzw. Separatormagazine gleichzeitig zu lagern und die Grundfläche für die Verpackungsfolienmagazine mehr als dem dreifachen der Grundfläche für die jeweiligen Elektroden- bzw. Separatormagazine entspricht, wird der Flächenbedarf für das Verpackungsfolienmagazin als Lagerfläche übernommen. Damit ist gewährleistet, dass auf der Lagerfläche entweder ein Verpackungsfolienmagazin oder Anoden-, Kathoden- und Separatormagazin gelagert werden können.

Für die Transportfläche, also die maximale Aufstellfläche für das Transportsystem wird angenommen, dass diese die Länge eines Moduls nicht überschreitet und die Modulbreite um nicht mehr als 50 % überschreitet. Es ergibt sich also eine Transportfläche von 1100 mm x 900 mm.

Eine Übersicht über die in der folgenden experimentellen Flächenbedarfsermittlung genutzten Grundflächen ist in Tabelle 4.3 dargestellt.

Die Anordnung der Flächen wird in einem zweidimensionalen Modell so variiert, dass der Gesamtflächenbedarf möglichst gering ausfällt. Dabei muss die Lagerfläche an einer Seite vollständig von an die Transportfläche grenzen, um den Materialaustausch problemlos zu ermöglichen. Weiterhin muss die Transportfläche an jedes Produktionsmodul auf einer Länge von mindestens 550 mm grenzen, um die Warenträgerübergabe zu ermöglichen

Tabelle 4.3: Der experimentellen Flächenbedarfsermittlung zur Ermittlung der Gesamtfläche und der Konfiguration der Anlage zugrunde liegende Flächenangaben

	Länge [mm]	Breite [mm]
Lagerfläche	650	650
Transportfläche	1100	900
Fertigungsfläche (x3)	1100	600

In Abbildung 4.4 sind verschiedene mögliche Konfigurationen dargestellt. Dabei weist die in blau dargestellte Konfiguration die kleinste Gesamtfläche auf. In dieser Konfiguration sind die drei Produktionsmodule um die Aufstellfläche des Transportsystems so angeordnet, dass sich ein Modul auf einer Seite des Transportsystems befindet, die zwei weiteren Produktionsmodule um 90° relativ dazu gedreht auf einer weiteren Seite. Die Lagerfläche befindet sich gegenüber von dem ersten Produktionsmodul. Es sind also drei der vier Seiten um das Transportsystem von den Produktionsmodulen bzw.

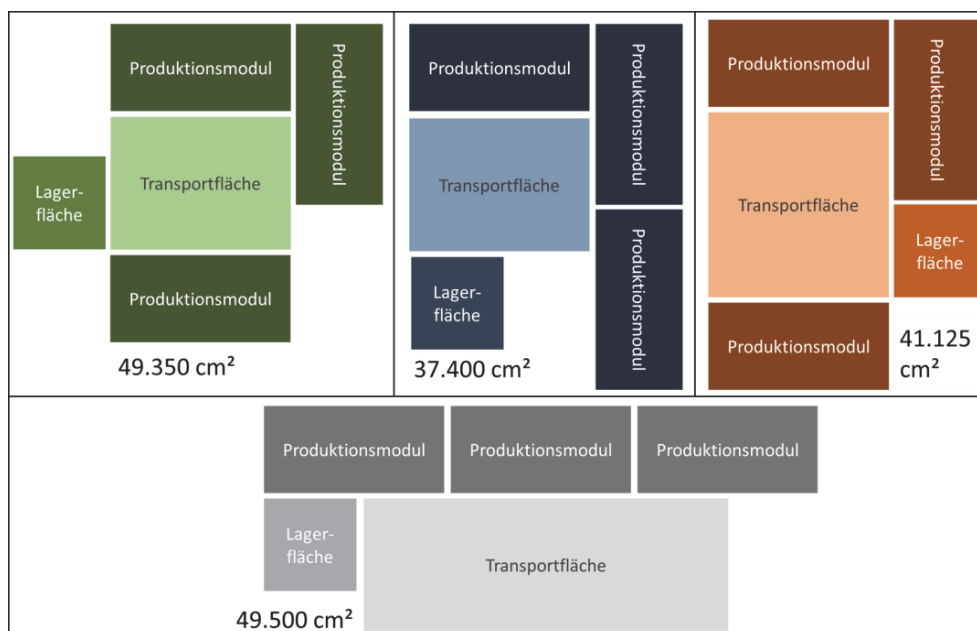


Abbildung 4.4: Verschiedene Raumkonzepte mit Flächenangaben (Abstände der einzelnen Module sind in der Rechnung nicht berücksichtigt)

der Lagerfläche besetzt. Damit kann an der verbleibenden Seite eine Tür zum Zugang der Anlage vorgesehen werden.

Die Gesamtanlagenfläche ergibt sich mit dieser Konfiguration zu 2,4 m x 2,4 m. Dabei wurden jeweils 10 cm Abstand als Reserve für ungeplante Umbaumaßnahmen oder Zugänglichkeit zu den Bauteilen zwischen Wand und den Produktionsmodulen berücksichtigt.

Die Raumhöhe des Microenvironments wird auf 2,5 m festgelegt und orientiert sich damit an der Höhe von Wohnräumen.

Zur Einbringung der Halbzeuge und Produkten in die Anlage wird eine Schleuse benötigt, welche verhindert, dass Feuchtigkeit unkontrolliert in die Produktionsumgebung dringen kann. Um Eindringen von Feuchtigkeit in die Elektroden und Separatoren zu verhindern, müssen diese in einer diffusionsdichten Transportbox bewegt werden, wenn diese sich außerhalb des Microenvironments befinden. Diese Transportbox muss eine Grundfläche aufweisen, welche mindestens der Transportfläche entspricht. Mit einer Höhe von 30 cm ist gewährleistet, dass die Magazine in der Transportbox Platz finden. Die Größe der Schleuse orientiert sich schließlich an der Größe dieser Transportbox, welche nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist auf welche daher nicht weiter eingegangen wird.

4.2.3 Auswahl der Materialflusslösung

Die Beschreibung der Auswahl der Materialflusslösung orientiert sich an (A_Fröhlich 2019). Die Aufgaben des Materialflusssystem lassen sich folgend zusammenfassen:

- Sicheres Greifen und Positionieren des Warenträgers bzw. des Werkstücks
- Flexibles Positionieren des Werkstücks für die Produktionsprozesse
- Austausch der Magazine des Stapelmoduls und des Verpackmoduls
- Bestückung der Transportbox mit leeren Magazinen und Produkten

Es werden drei verschiedene Komponentenlösungen für den Transport betrachtet: band- oder bahngeführtes System (Transportband, Schienensystem etc.), Vertikalknickarmroboter und Horizontalknickarmroboter (SCARA). Diese werden hinsichtlich Genauigkeit, Geschwindigkeit, Flexibilität sowie Umsetzbarkeit bewertet. Das Ergebnis der Bewertung ist in der Größenordnung von 0,01 mm.

Tabelle 4.4 zusammengefasst. Die Genauigkeit ist für alle Varianten positiv bewertet. Für alle Lösungen ist die Positioniergenauigkeit in der Größenordnung von 0,01 mm.

Tabelle 4.4: Bewertung der betrachteten Materialtransportsysteme im Kontext der Produktion in einer Fertigungszelle

	Vertikalknickarm-roboter	Horizontalknick-armroboter (SCARA)	Bahn- oder band-geführtes System
Genauigkeit	+	+	+
Geschwindigkeit	++	++	o
Flexibilität	++	+	--
Umsetzbarkeit	++	-	--
Gesamt	++	+	-

Durch technischen Aufwand (bspw. Kamerasysteme oder Sensoren zur Positionserfassung) lässt sich diese Genauigkeit für jedes System bei Bedarf verbessern. Diese Genauigkeit ist jedoch für sämtliche Prozessschritte ausreichend. Die Geschwindigkeit wird für Vertikalknickarmroboter sowie für SCARA sehr positiv bewertet. Die Positionen können direkt und mit der maximalen Geschwindigkeit der Roboter (abhängig von Typ und Baugröße) im Bereich von 25-600 cm/s angefahren werden. Für positionierfähige Band- oder Bahnsysteme ergibt eine Recherche Geschwindigkeiten von maximal 100 cm/s. Daher wird die Geschwindigkeit für diese Systeme neutral bewertet. Die Flexibilität wird für den Vertikalknickarmroboter sehr positiv bewertet, da dieser das Werkstück mit 6 Freiheitsgraden (3 translatorische und 3 rotatorische) im Raum vollflexibel bewegen kann. Mittels SCARA lassen sich lediglich 4 Freiheitsgrade realisieren (3 translatorische sowie 1 rotatorischer), weshalb diese Lösung als positiv beurteilt wird. Die Flexibilität eines band- oder bahngeführten Systems erlaubt nativ lediglich die Variation eines Freiheitsgrades entlang der Bahnkurve des Systems. Diese wird daher sehr negativ bewertet. Die Umsetzung der Transportsystemlösung im Kontext der Fertigungszelle wird für den Vertikalknickarmroboter sehr positiv bewertet. Neben dem mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Anschluss des Systems sind lediglich geeignete Endeffektoren notwendig, um die oben definierten Aufgaben zu erfüllen. Für das System SCARA wird die Umsetzbarkeit negativ bewertet, da sämtliche Positionen lediglich von oben angefahren werden können. Dabei ist eine Kollisionsvermeidung äußerst schwierig und muss bei der Konstruktion der Module genau betrachtet werden. Für bahn- oder bandgeführte Systeme wird die Umsetzbarkeit als sehr negativ bewertet, da diese für alle definierten Aufgaben Zusatzaufbauten mit entsprechend spezialisierten Werkzeugen brauchen. Dies steigert den Aufwand, mit welchem die Umsetzung gelingt, stark. Insgesamt wird ein Vertikalknickarmroboter als sehr positiv bewertet,

während ein SCARA-System als positiv bewertet wird. Ein bahn- oder bandgeführtes Transportsystem erhält lediglich eine negative Bewertung.

Damit wird als Materialtransportsystem ein Vertikalknickarmroboter gewählt. Dessen Auswahl ist im Folgenden beschrieben.

Die Anforderungen an den Vertikalknickarmroboter leiten sich aus dem Rauml原因 und aus den Produkten ab. Durch das Rauml原因 ergibt sich eine Mindestreichweite von 1300 mm. Damit ist gewährleistet, dass der Roboter mit Endeffektor sämtliche Produktionsrelevante Positionen auf den Produktionsmodulen sowie die Transportkiste erreichen kann. Aus dem Produkt (KIT-Zelle) mit einem Gewicht von ca. 500 g und den Abmaßen der Verpackungsfolie ergeben sich die Lastanforderung. Die Größe der Verpackungsfolie definiert die Minimalgröße des Endeffektors mit 45 cm x 45 cm Fläche. Ein Greifer dieser Größe aus Kunststoff- und Aluminiumbauteilen wird auf ca. 10 kg Gewicht geschätzt, gemeinsam mit dem Gewicht der Zelle und einem Sicherheitsfaktor von ca. 1,5 wird die Mindestlastanforderung auf 15 kg definiert. Neben dieser quantitativen Anforderungen wird eine qualitative Anforderung an den Roboter gestellt. Um Kollisionen zu vermeiden und die Bahnplanung möglichst einfach zu gestalten, werden Roboter mit kompakter Bauform und Aufstellfläche bevorzugt.

Aufgrund dieser Anforderungen, besonders der Reichweite des Roboters, wird ein Sechs-Achs-Knickarmroboter ausgewählt, da in dieser Baugröße kaum Roboter in Fünf- oder Vier-Achs-Kinematik kommerziell verfügbar sind. Weiterhin ergeben sich durch die Sechs-Achs-Kinematik keine Nachteile in der Produktion oder Inbetriebnahme.

Eine Produktrecherche hat ergeben, dass das Produkt „Cybertech nano KR22-1610“ der Firma KUKA alle Anforderungen voll erfüllt. Dabei weist dieser Roboter eine Aufstellfläche von nur 60 cm x 60 cm auf, bei einer Nenntaglast von 22 kg und einer Reichweite von 1610 mm trifft das Produkt die Anforderungen ausreichend genau. Die Bauform ist dabei kompakt genug, um die Produktion innerhalb einer Fertigungszelle zu realisieren. Durch die Verwendung eines Industrieroboters in der Fertigungszelle wird diese auch als Roboterzelle bezeichnet.

In Abbildung 4.5 ist das Konzept der Roboterzelle inklusive des oben genannten Roboters maßstabsgetreu dargestellt. Die Flächen, welche von den Produktionsmodulen besetzt werden, sind entsprechend gekennzeichnet.

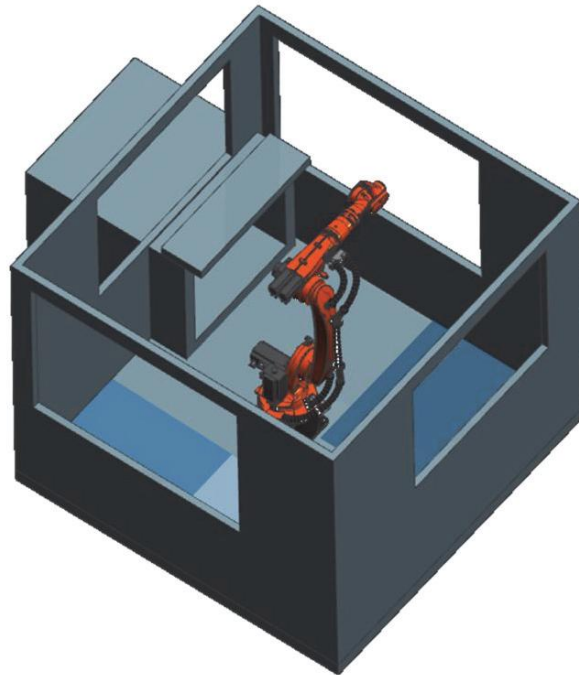


Abbildung 4.5: Maßstabsgetreues Modell des Raumkonzepts der Roboterzelle mit Robotermodell, angedeuteter Materialschleuse. Die Flächen der Produktionsmodule sind blau gekennzeichnet

Damit sind sämtliche räumliche und logistische Randbedingungen für die Roboterzelle festgelegt und bilden unter anderem die Grundlage für die Gestaltung der Produktionsmodule.

4.3 Funktions- und Prozessanalyse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Funktionsanalyse als Funktionspläne sowie die Vorentwicklung für die einzelnen Prozesse für jedes betrachtete Produktionsmodul vorgestellt. In Kapitel 4.3.1 wird das Einzelblattstapeln betrachtet, in Kapitel 4.3.2 wird die Prozessauswahl zum Kontaktierverfahren diskutiert. Abschließend wird in Kapitel 4.3.3 der flexible Verpackprozess entwickelt.

4.3.1 Einzelblattstapeln

Dieses Kapitel basiert auf (A_Vogt 2019). Die Grundfunktionen für das Einzelblattstapeln lassen sich aus der Anwendung ableiten und ergeben sich zu:

- Speicherung der Einzelblätter in Magazinen
- Greifen der Einzelblätter
- Transport der Einzelblätter zur Stapelablage

- Ablage der Einzelblätter auf dem Zellstapel
- Zellstapel fixieren

Aus den Grundfunktionen lassen sich Haupt- und Nebenfunktionen bestimmen. Das Greifen und Ablegen der Einzelblätter werden als Hauptfunktionen definiert, die Speicherung und der Transport der Blätter als Nebenfunktionen, da diese keinen unmittelbaren Einfluss auf die Stapelgenauigkeit haben.

In Abbildung 4.6 ist der Funktionsplan nach VDI 2860 für das Einzelblattstapeln dargestellt. Dieser dient im weiteren Verlauf der Arbeit als Grundlage für die praktische Umsetzung des Stapelmoduls. Die Speicherung der Einzelblätter in Magazinen ist im Funktionsplan ganz links dargestellt. Es erfolgt eine Überprüfung der Anwesenheit der Magazine, bevor der Stapelprozess startet. Danach wird eine Anode aus dem Magazin gegriffen und zur Stapelablage geführt. Dort wird diese zunächst vom Magazin abgesehen und danach erneut auf der Stapelablage gegriffen. Im Anschluss erfolgt der entsprechende Vorgang mit einem Separatoreinzelblatt. Dabei wird das Stapeln im Funktionsplan als Fügen des ersten abgelegten Anodenblattes mit dem Separatorblatt dargestellt. Im Anschluss erfolgt der oben Beschriebene Prozess mit einer Kathode und erneut mit einem Separatorblatt. Dieser gesamte Ablauf findet n mal statt, bis die gewünschte Stapeldicke erreicht ist. Die Entnahme des Stapels ist durch ein Lösen des Stapels durch die Stapelablage und ein Greifen dessen durch den Endeffektor des zentralen Handlingroboters dargestellt.

Zur Entwicklung eines flexiblen Greif- und Ablageprozesses werden Versuche durchgeführt. Zunächst wird dazu der grundlegende Greifmechanismus ausgewählt. Grundsätzlich können flächige, biegeschlaffe Bauteile wie Elektrodenblätter über Vakuumgreifer, Niederdruckflächengreifer, Bernoulli-Greifer oder elektrostatische Greifer gegriffen werden. Da elektrostatische Aufladungen und Effekte bei Batteriezellen unter

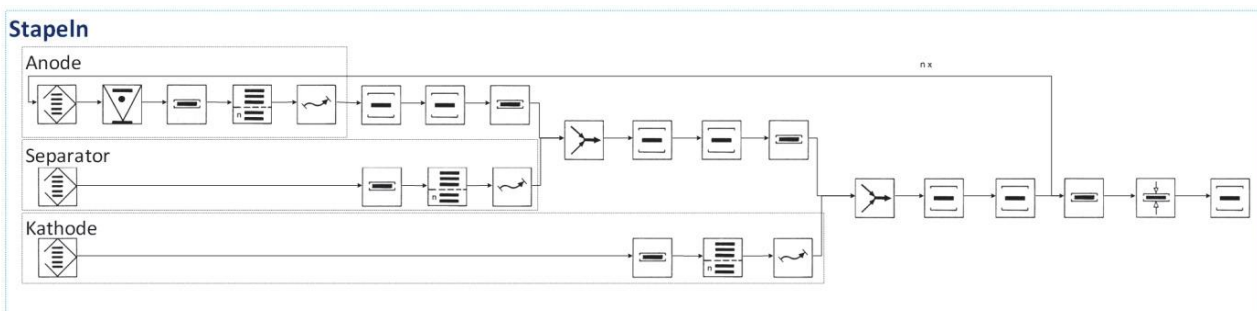


Abbildung 4.6: Funktionsplan des Stapelvorgangs des Stapelmoduls nach VDI 2860

allen Umständen verhindert werden müssen, scheiden elektrostatische Greifer aus. (Fröhlich et al. 2018, S. 342ff) vergleichen die übrigen Greifertypen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der Batteriezellstapelbildung. Dabei hat sich gezeigt, dass Niederdruckflächengreifer das beste Ergebnis vorweisen: Die Elektrodenblätter konnten sicher gegriffen und Beschädigungen konsequent vermieden werden. Weiterhin werden durch das flächige Ansaugen und den hohen Luftstrom bei niedriger Druckdifferenz Partikel, welche evtl. auf der Elektrodenoberfläche haften, abgesaugt. Die als schonend geltenden Bernoulligreifer versetzen die Elektroden hingegen teilweise in Oszillation, wodurch Aktivmaterial abplatzen kann. Daher wird in Übereinstimmung mit (Fröhlich et al. 2018) der Niederdruckflächengreifer als Greifprinzip ausgewählt. In Abbildung 4.7 sind die Greifertypen mit Funktionsprinzip dargestellt.

Eine Bedingung für das Greifen und Ablegen der Einzelblätter ist weiterhin, dass das Einzelblatt zu jedem Zeitpunkt fixiert ist und nicht verrutschen kann. Dazu muss die Ablage und das Magazin auf das Greiferdesign abgestimmt werden. Eine Möglichkeit ist die von (Baumeister 2017, S. 98) verwendete Lösung, deren Ablauf in Abbildung 4.8 zu sehen. Dabei steht die Elektrode rund um den Greifer deutlich über, wird also nicht vollflächig vom Niederdruckflächengreifer gegriffen. Bei der Ablage werden die Niederhalter, welche den Zellstapel fixieren, zunächst ignoriert. Die Elektrode kollidiert mit diesen Niederhaltern im überstehenden Bereich. Dadurch kann sich die Elektrode verformen und über die Niederhalter legen. Im Anschluss werden die Niederhalter geöffnet und wieder geschlossen, um die neu abgelegte Elektrode auf dem Stapel zu fixieren. Dieses Prinzip ist aus Gründen der Flexibilität nicht für die Anwendung in dieser Arbeit geeignet, da ohne Greiferwechsel das kleinste Format und das größte Format gefertigt

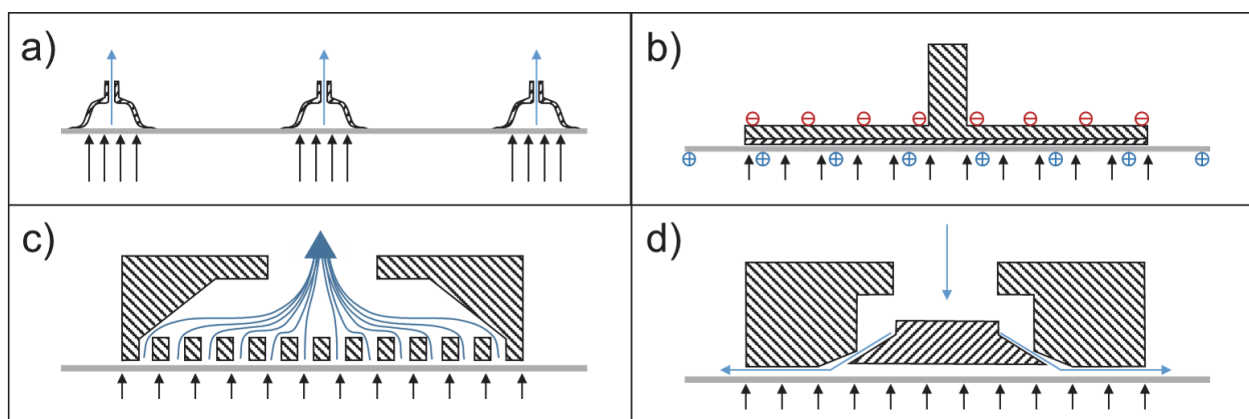


Abbildung 4.7: Vier Greifertypen als Prinzipskizze im Schnitt. a) Vakuumbreifer b) elektrostatischer Greifer c) Niederdruckflächengreifer und d) Bernoulli-Greifer

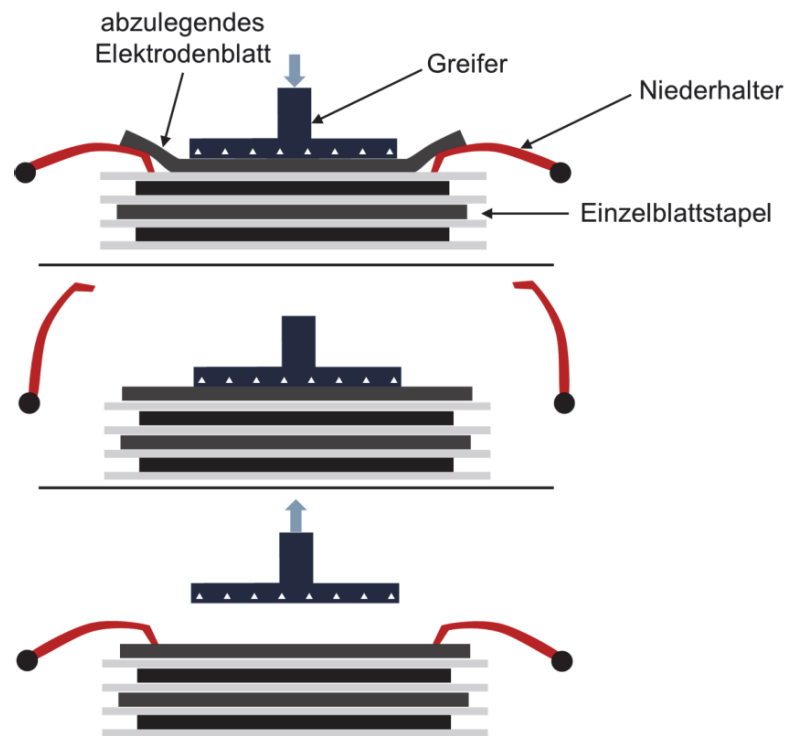


Abbildung 4.8: Ablagevorgang einer Elektrode in (Baumeister 2017) als Skizze

können werden müssen, siehe Anforderungen in Tabelle 4.1. Der Greifer müsste dazu am kleinsten Format ausgelegt werden, dabei ist nicht mehr sichergestellt, dass die größte Elektrode ohne nennenswerten Durchhang gegriffen werden kann.

Da die lediglich wenige Mikrometer dicken Separatoren äußerst biegeschlaff sind, müssen diese als Einzelblatt unbedingt vollflächig gegriffen werden, um das Herabhängen und die damit undefinierte Ablage der Blätter zu vermeiden. Dazu wird in (Baumeister 2017, S. 107) ein knickbarer Greifer verwendet, der Ablagevorgang ist in Abbildung 4.9 skizziert: Zunächst wird das Separatorblatt flach gegriffen, vor der Ablage wird der Greifer an den Enden nach oben geknickt, sodass der mittlere, flache Teil auf den Zellstapel fahren kann, ohne dass der Separator oder Greifer mit den Niederhaltern kollidiert. Im Anschluss öffnen die Niederhalter, dabei wird der Stapel durch den Druck des Greifers fixiert. Der Greifer knickt nun nach unten, so dass Separator und Greifer vollflächig auf dem Stapel liegen. Die Niederhalter schließen und greifen in Aussparungen im Greifer auf den nun abgelegten Separator.

Dieser Vorgang zum Greifen von Separatoren ist generell gut geeignet, um flexibel Elektroden und Separatoren aufnehmen und ablegen zu können. In Abbildung 4.10

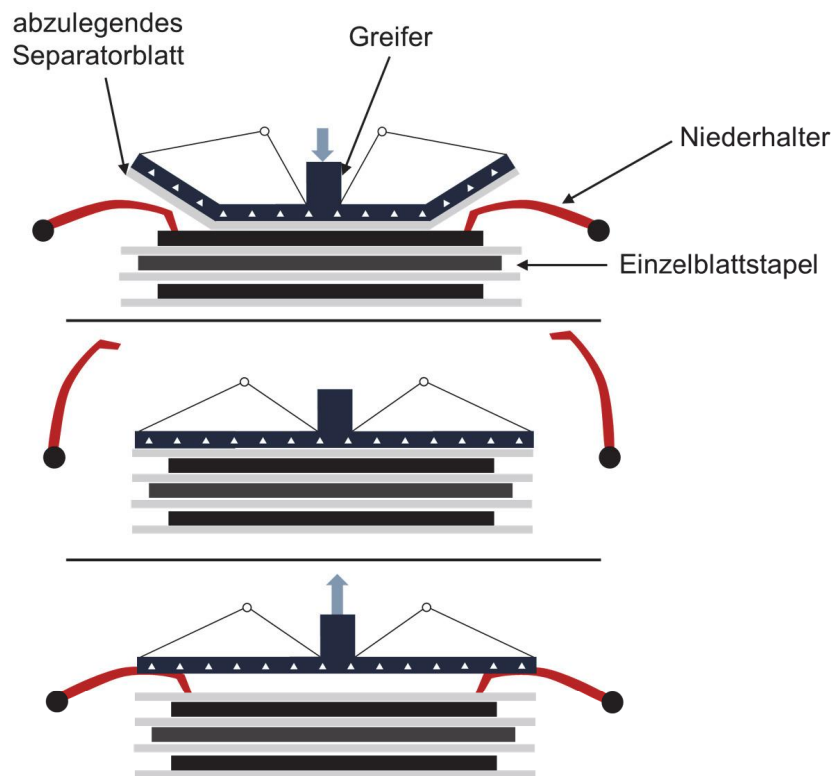


Abbildung 4.9: Ablauf der Ablage eines Separatorblattes in (Baumeister 2017) als Skizze

sind die Aufgaben des Greifers im Funktionsplan des Stapelmoduls farblich hervorgehoben. Daraus lassen sich nun drei Funktionen für den Greifer definieren:

- Sichere Aufnahme der Einzelblätter verschiedener Formate
- Fixierung des Zellstapels bei der Blattablage durch Greifer ohne Kollision mit den Niederhaltern
- Fixierung des Elektroden-/Separatorstapels bei der Aufnahme eines Einzelblattes aus dem Magazin

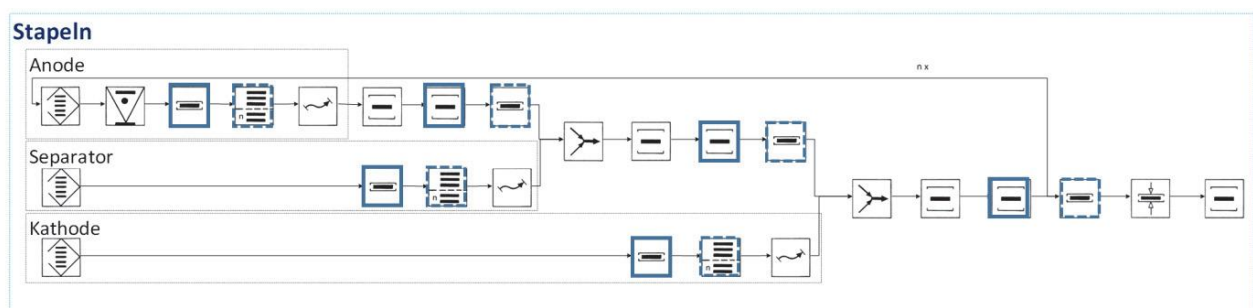


Abbildung 4.10: Funktionsplan des Stapelmoduls mit farblich blau hervorgehobenen Funktionen des flexiblen Einzelblattgreifers. Durchgezogener Rahmen: alleinige Funktion des Greifers, gestrichelter Rahmen: Funktion wird teilweise vom Greifer übernommen

Zu diesen Funktionen wurden Umsetzungsalternativen bewertet und die potentielle(n) Lösung(en) mittels Greifversuchen validiert. Die Umsetzungsalternativen für die Funktion „sichere Aufnahme der Einzelblätter verschiedener Formate“ sind in Tabelle 4.5 aufgelistet. Diese gliedern sich in zwei Hauptkonzepte, mit gleichbleibender Greiferfläche und mit veränderlicher Greiferfläche. Im ersten Fall wird die Greiferfläche am größtmöglichen Format ausgelegt, der Greifer ist jedoch in der Lage, auch kleinere Blätter anzusaugen. Dazu werden verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten untersucht, die in Tabelle 4.5 gelistet sind. Bei dem Greifen eines kleineren Blattes entsteht in dem vorliegenden Fall eine Leckageströmung, da der Greifer nicht vollständig von der Elektrode bedeckt ist. Wird nun der Luftstrom durch leistungsstarke Ejektoren so groß gewählt, dass dies auf die sichere Aufnahme des Einzelblattes keinen Einfluss hat, wird dabei von einer Teilbelegung des Greifers gesprochen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verteilung mehrerer Ejektoren auf dem Greifer und der daraus resultierenden Einstellbarkeit der Stärke des Luftstroms bei wechselnder Leckageströmung, also bei Formatwechsel des Einzelblattes. Wird der Greifer in abgetrennte Kammern unterteilt, welche einzeln mit Luftstrom beschaltet werden können, wird von einem Greifer mit schaltbaren Kammern gesprochen. Dadurch lässt sich die Leckageströmung minimieren, indem nur die Kammern mit Unterdruck beaufschlagt werden, welche (teilweise) von Einzelblättern bedeckt sind. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die nicht vom Einzelblatt belegten Bereiche über Strömungswiderstände abzudecken, so dass dieser Bereich nicht mehr effektiv zur Leckageströmung beiträgt. Dazu sind geeignete, positionierbare Abdeckungen notwendig. Für Greifer mit veränderlicher Fläche wird eine entsprechende Aktorik und Kinematik benötigt, welche den Greifer an die jeweilige Elektrode anpasst. Dazu wird der Greifer in kleinere Segmente zerlegt, diese können dann flexibel positioniert werden (Greifer mit beweglichen Teilbereichen) oder einzelne Segmente dem Luftstrom und der Greiferfläche hinzugefügt oder weggenommen werden. Dies geschieht entweder durch eine Umkonfiguration eines modular erweiterbaren Greifers oder durch eine entsprechende Aktorik am Greifer selbst. (A_Vogt 2019, S. 67ff)

In Tabelle 4.6 sind die Lösungsansätze zur zweiten und dritten Funktion der Greifer, der Fixierung des Zellstapels & des Magazinstapels jeweils ohne Kollision mit den Niederhaltern, aufgelistet und bildlich dargestellt.

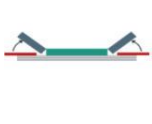

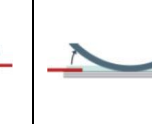

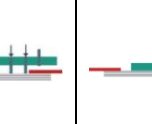
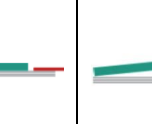
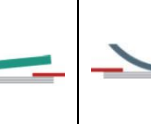
Tabelle 4.5: Lösungsmöglichkeiten zur Funktion „Sichere und flexible Aufnahme von Einzelblättern“ nach (A_Vogt 2019)

Gleichbleibende Greiferfläche				Veränderbare Greiferfläche	
Teilbelegung	Mehrere Ejektoren	Schaltbare Kammern	Saugöffnungen geregelt über Strömungswiderstand	Bewegliche Teilbereiche	Hinzufügen/Wegnahme von Teilbereichen

Um die mechanische Komplexität eines Greifers mit beweglichen Komponenten zu vermeiden, wird der Fokus zunächst auf Greifer ohne bewegliche Komponenten gelegt. Wird dabei keine zufriedenstellende Lösung möglich, werden auch mechanisch komplexere Greifer betrachtet. Greifer mit einer deutlich kleineren Grundfläche wurden oben bereits erwähnt, diese sind für das flexible Greifen von Elektroden zwar einsetzbar, nicht jedoch für Separatoreinzelblätter verschiedener Formate (s.o.). Bei schräg aufsitzenden, ebenen Greifern ergibt sich eine resultierende Kraft in der Ablageebene, was zu Verschiebungen der Blätter im Stapel führen kann, besonders da die Niederhaltung in diesem Fall immer nur einseitig erfolgen kann. Bei einem gewölbten Greifer wird das Einzelblatt entsprechend der Form des Greifers gebogen/verformt, eine solche Verformung findet auch bei der Verarbeitung von Elektroden als Bahnware bspw. in der Elektrodenfertigung (siehe Kapitel 1.1.1) statt und hat bei Einhaltung der Prozessgrenzen keine ungewünschten Auswirkungen auf die Elektrode. Das Greifen von Elektroden- und Separatoreinzelblättern verschiedener Formate ist also mit dem gewölbten Greifer möglich, durch die Wölbung wird bei der Fixierung des Zellstapels/des Magazin­stapels eine Kollision mit den Niederhaltern vermieden, wie in Abbildung 4.11 dargestellt. Daher gilt der Greifer mit gewölbter, starrer Greiferfläche als die geeignetste Greifervariante.

Da die Auswahl der genauen Greiferform und der Greiferfläche im Sinne der Funktion „Sichere und flexible Aufnahme von Einzelblättern“ nicht aus theoretischen Überlegungen abzuleiten ist, werden Greifversuche durchgeführt. Dazu werden zunächst Separator- und Anodenblätter im BaTec-Format von verschiedenen Greiferprototypen gegriffen. Als leistungsstarker Niederdruckerzeuger wird ein Coanda-Ejektor eingesetzt, welcher einen hohen Volumenstrom bei niedriger Druckdifferenz erzeugt. Dies

Tabelle 4.6: Lösungsansätze zur Funktion „Fixierung des Zellstapels bei der Blattablage durch Greifer ohne Kollision mit den Niederhaltern“, nach (A_Vogt 2019)

Mit beweglichen Komponenten				Ohne bewegliche Komponenten		
Klappbare Enden	Segmentweise	Greiferformveränderlich	Ausfahrbare Stifte	Kleinere Grundfläche	Schräges Aufsetzen	Gewölbte Greiferform
						

ist optimal für Ansaugvorgänge mit Leckageströmung, da der Volumenstrom groß genug ist, um trotz Leckage genug Kraft für das Ansaugen des Einzelblattes aufzubringen. Die untersuchten Greifer werden bei variablem Eingangsdruck am Ejektor und damit variablem Volumenstrom durch den Ejektor betrieben. Alle Varianten werden hinsichtlich ihrer Ansaugzeit und Ansaugsicherheit bewertet. Für das am besten bewertete System werden dann Ansaugtests mit Kathoden sowie Anoden des kleinsten zu fertigenden Formats durchgeführt.

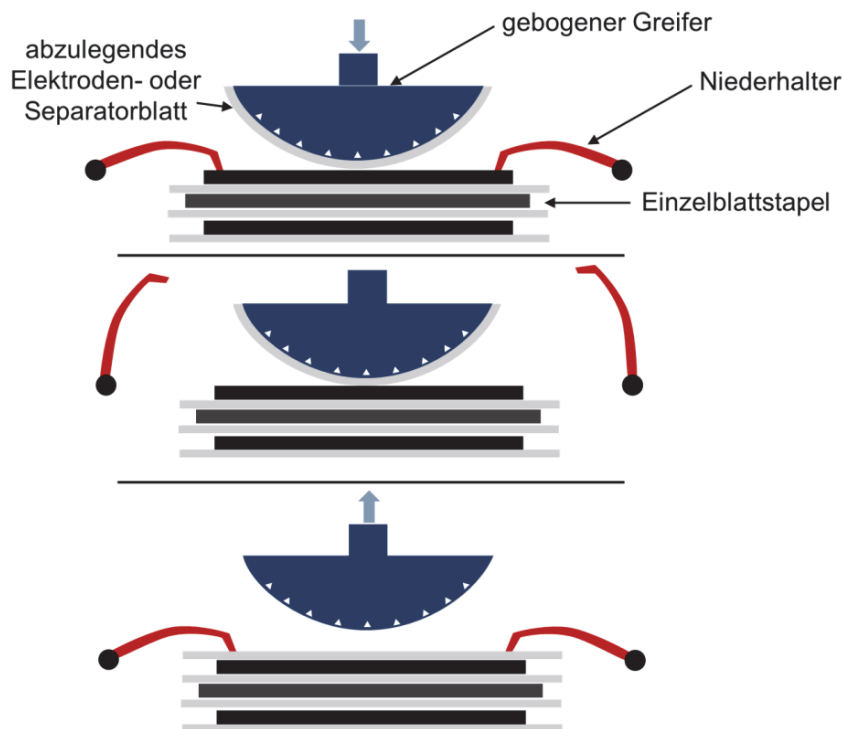


Abbildung 4.11: Ablagevorgang eines Elektroden- oder Separatorblattes mit gebogenem Greifer

Als Form der Greifer wurde dabei die Form einer unter Schwerkraft durchhängenden Kette – beschrieben durch eine Kosinus-Hyperbolicus-Funktion. Aus diesem Grund wurde diese Art von Greifer auf „Catenary-Greifer“ getauft (von engl. *catenary line* = Kettenlinie). Dabei wurde die Greiferfläche so gewählt, dass diese minimal größer ist als die Separatorfläche des größten Formats. Im Versuch wurden verschiedene Ausführungen des Catenary-Greifers im Ansaugversuch getestet, dabei wurde zunächst die Wölbung der Greiferfläche dreistufig variiert, was in Abbildung 4.12 dargestellt wird. Die Ergebnisse zu diesen Tests sind in Greifer V3-1 weist im Versuch ein sehr sicheres Ansaugverhalten auf. Das Anodenblatt legt sich ohne erkennbare Verzögerung an die freigegebene Fläche an, wird diese durch Betätigen des oben genannten Mechanismus erweitert, so legt sich die

Tabelle 4.7 dargestellt sowie in (Storz et al. 2021, S. 250) veröffentlicht.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass Greifervariante V3 mit der geringsten Wölbung die besten Ansaugergebnisse sowohl für Separator- als auch Anodenblätter vorweist.

Im Anschluss wurden mit den Varianten V3-1 und V3-2 weitere Ansaugtests gemacht, welche auf der Greifervariante V3 basieren. V3-1 verfügt dabei über einen händisch betätigten Mechanismus, welcher die Greiferfläche abdeckt und diese bei Betätigung von innen nach außen bei beliebiger Geschwindigkeit freigibt. Somit kann gewährleistet werden, dass die Leckageströmung minimal gehalten wird. Der Greifer V3-2 verfügt über zwei Coanda-Ejektoren, welche jeweils eine getrennte Kammer bedienen. Der Greifer weist also eine innere Kammer und eine äußere Kammer auf, welche sich unabhängig voneinander evakuieren lassen. In Abbildung 4.13 sind die Greifer V3-1 und V3-2 detailliert dargestellt.

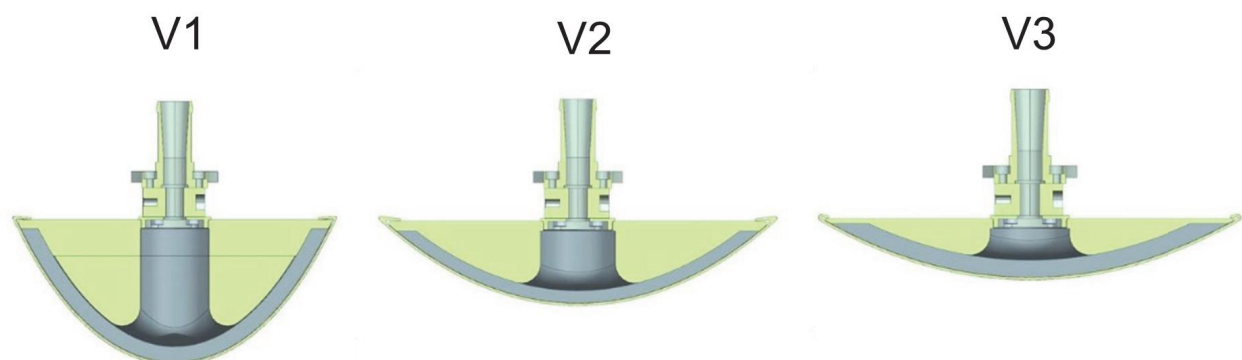


Abbildung 4.12: Schnitt der Greifervarianten V1, V2 und V3 aus (Storz et al. 2021)

Greifer V3-1 weist im Versuch ein sehr sicheres Ansaugverhalten auf. Das Anodenblatt legt sich ohne erkennbare Verzögerung an die freigegebene Fläche an, wird diese durch Betätigen des oben genannten Mechanismus erweitert, so legt sich die

Tabelle 4.7: Ansaugzeiten für Separator- und Anodeneinzelblätter der verschiedenen Greifervarianten bei variablem Ansaugvolumenstrom. X entspricht keiner Ansaugung, nach (Storz et al. 2021)

Druck am Ejektor [bar]	Volumenstrom durch Ejektor [l/min]	Separator			Anode		
		Greifer V1	Greifer V2	Greifer V3	Greifer V1	Greifer V2	Greifer V3
0,5	40-60	X	X	X	X	X	X
1	70-90	X	X	3-4 s	X	X	X
2	120-140	X	3 s	0,5-1 s	X	X	8 s
3	170-190	X	1-2 s	< 0,5 s	X	X	3 s
4	220-240	2 s	< 1 s	< 0,5 s	X	X	< 1 s

Anode ebenfalls ohne Verzögerung an. Damit lässt sich die Ansaugeschwindigkeit bei einer gleichzeitig optimalen Flexibilität präzise steuern.

Bei den Versuchen zum Greifertyp V3-2 wurde zunächst die innere Kammer mit Niederdruck beaufschlagt, nach einer kurzen Zeit von ca. 0,5 Sekunden wurde dann die äußere Kammer ebenfalls evakuiert. Die Ansaugversuche sind ebenfalls erfolgreich verlaufen, die in Tabelle 4.7 beschriebenen beobachtete Verzögerung beim Ansaugen

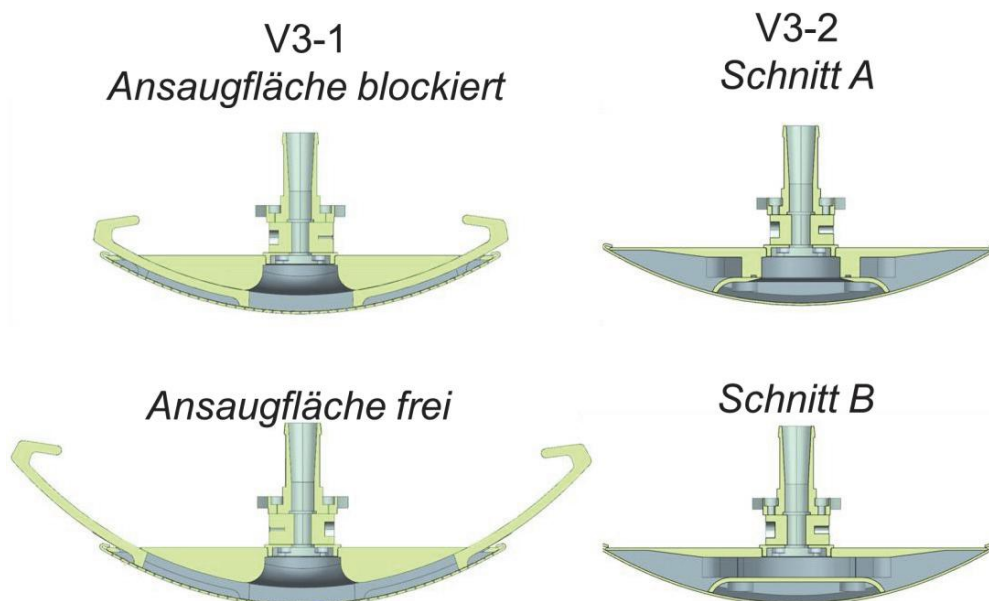


Abbildung 4.13: Schnitte der Greifervarianten V3-1 und V3-2

des Blatts ist jedoch bei diesem Greifertyp ebenfalls vorhanden. Als Zusammenfassung der Versuche kann gesagt werden, dass die niedrige Wölbung des Greifers V3 zum gewünschten Ergebnis des sicheren Ansaugens und Ablegen der Einzelblätter an den Greifer geführt hat. Greifertyp V3-1 mit beweglichen Strömungswiderständen zur Leckageminimierung an der Ansaugfläche funktioniert einwandfrei und verzögerungsfrei, während Typ V3-2 mit zwei separat evakuierbaren Kammern ebenfalls ein sicheres Greifen des Anodenblatts zulässt, dabei entsteht jedoch eine kleine Verzögerung von $< 0,5$ Sekunden.

Die besten Ergebnisse im Ansaugversuch zeigt also Greifer V3-1. Da die Komplexität der Bewegung der Strömungswiderstände jedoch hoch ist, eine geeignete Mechanik das Gewicht des Greifers deutlich erhöht und eine präzise Steuerung und Positionierung dieser beweglichen Teile mit hohen Kosten und Aufwänden verbunden ist, wird der ebenfalls fähige Greifertyp V3-2 für das weitere Vorgehen ausgewählt. Die technische Umsetzbarkeit von Greifertyp V3-2 ist im Vergleich zu V3-1 minimal, die prozesstechnischen Vorteile von Greifertyp V3-1 dabei nur marginal.

Abschließend werden Ansaugversuche mit Kathoden- und Separatorblättern im BaTec-Format sowie im kleinsten zu fertigenden Format durchgeführt. Auch hier konnte ein sicheres Ansaugen beobachtet werden, wobei die Ansaugzeiten vergleichbar sind mit den bereits ermittelten Ansaugzeiten bei Anodenblättern (A_Vogt 2019, S. 71). Damit ist der Ansaugprozess validiert und die Grundlage für das finale Design des Greifers gelegt. Die Komponentenauswahl und die Konstruktionsentscheidungen für das Einzelblattstapelmodul sind in Kapitel 4.4.1 beschrieben.

4.3.2 Kontaktieren

Zum Kontaktieren gibt es, wie in Kapitel 2.1.3.2 erwähnt, zwei verschiedene Prozessalternativen. Diese werden bewertet und das passendere Verfahren für das Kontaktiermodul ausgewählt. Die Prozessalternativen sind das Ultraschallschweißverfahren und der Laserschweißprozess. In Tabelle 4.8 sind die Verfahren gegenübergestellt anhand ihrer Produktivität, Flexibilität, Qualität und Umsetzbarkeit bewertet.

Ultraschallschweißprozesse sind extrem produktiv mit Prozesszeiten unterhalb einer Sekunde, während die Produktivität der Laserprozesse stark von der Laserleistung und der verwendeten Scanneroptik abhängt. Ein Vorteil des Laserprozesses stellt seine Flexibilität dar. Es können sämtliche Schweißnahtgeometrien ohne Werkzeugwechsel abgebildet werden, auch dickere Stapel können mit geeigneter Parameterwahl kontaktiert

werden. Hier bleibt beim Ultraschallschweißen nur ein Werkzeugwechsel, wobei beachtet werden muss, dass in der Regel eine Vielzahl an Ableitergeometrien mit dem gleichen Werkzeug verarbeitet werden kann. Dabei ist die Schweißnahtgeometrie jedoch abhängig vom verwendeten Werkzeug, der sogenannten Sonotrode. Sehr dicke

Tabelle 4.8: Vergleich der Prozessalternativen zum Kontaktieren der Zellen

	Ultraschallschweißen	Laserschweißen
Produktivität	++	o
Flexibilität	o	++
Qualität	++	+
Umsetzbarkeit	++	--
Gesamt	++	o

Zellstapel lassen sich mittels Ultraschall schwer verbinden, da die Energie stark an den Grenzflächen der Einzelblätter dissipiert und eventuell nicht ausreicht, um das Stromsammelmaterial aller Schichten lokal aufzuschmelzen. Hier haben Laserverfahren durch ihre gut skalierbare Schweißleistung einen Vorteil. Ein optimal parametrierter Ultraschallschweißprozess liefert jedoch bei konstanten Umgebungsbedingungen reproduzierbar gute Schweißnähte. Bei Laserschweißprozessen entstehen immer Spritzer, welche durch weggeschleuderte Schmelzetropfen aus der Schweißkapillare hervorgerufen werden. Je größer die Einschweißtiefe, desto mehr Spritzer entstehen. Durch eine geeignete Absaugung und eine optimierte Prozessparameterwahl lässt sich dies jedoch minimieren, weshalb dem Laserschweißprozess zum Kontaktieren von Zellen eine gute Qualität bescheinigt wird. Der signifikanteste Unterschied ergibt sich im Vergleich der Umsetzbarkeit der beiden Prozessalternativen. Während für den Ultraschallschweißprozess lediglich ein Ultraschallgenerator und das Schweißgerät samt Werkzeug benötigt wird, wird für das Laserschweißen eine hohe Anzahl an Peripherie und Schutzausrüstung benötigt: Neben der Strahlungsquelle und Strahlführungsapparatur wird zwingend eine Absaugung samt Filter benötigt, welche giftige Dämpfe aus der Produktionsumgebung führen. Weiterhin wird eine absolut laserdichte Umhausung für das Produktionsmodul oder aber die gesamte Roboterzelle benötigt, um eine Gefährdung von Menschen durch Laser der Klasse 1 auszuschließen. Bei Umbaumaßnahmen, bei welchen die laserdichte Umhausung abgenommen werden muss, müssen weitere Sicherheitsmaßnahmen von geschultem Fachpersonal erfolgen, um eine Gefährdung auszuschließen.

Aus den oben genannten Gründen wird ein Ultraschallschweißprozess bevorzugt und als Kontaktierverfahren für das Produktionsmodul eingesetzt.

In Abbildung 4.14 ist der Funktionsplan für das Kontaktiermodul dargestellt. Dieser beschreibt den folgenden Ablauf: Der Ableitertab 1 (Anode) ist im Magazin gespeichert, wird gegriffen und dem Magazin entnommen. Danach wird er zum Schweißgerät und mit dem Zellstapel zusammengeführt. Es erfolgt der Schweißvorgang, im Anschluss wird der Ableitertab losgelassen und der Zellstapel mit Tab an die zweite Schweißposition geführt. Währenddessen erfolgt der Ablauf für Ableitertab 2 analog zum ersten. Nach der Zusammenführung von Zellstapel und dem zweiten Ableitertab wird der zweite Schweißprozess durchgeführt und der Ableitertab losgelassen. Damit ist der Kontaktierprozess abgeschlossen, es ergeben sich die Nebenfunktionen „Ableiterblech greifen und positionieren“ und „Zellstapel positionieren“ und die Hauptfunktion „Ableiterblech und Zellstapel fügen“.

4.3.3 Verpacken

In diesem Kapitel findet die Entwicklung des flexiblen Verpackprozess statt. Dazu wird zunächst ein geeigneter Prozess ausgewählt und mithilfe von Versuchen validiert. Abschließend wird das Anlagenkonzept mithilfe eines Funktionsplans erstellt und Haupt- und Nebenfunktionen identifiziert.

Prozessauswahl

Für das Versiegeln von Pouch-Folie unter Verwendung von Siegelbalken, wie es im Stand der Technik ausschließlich praktiziert wird, stehen zwei Prozesse zur Auswahl: das Versiegeln mittels Heißsiegelprozess und das Versiegeln mittels Ultraschallschweißen.

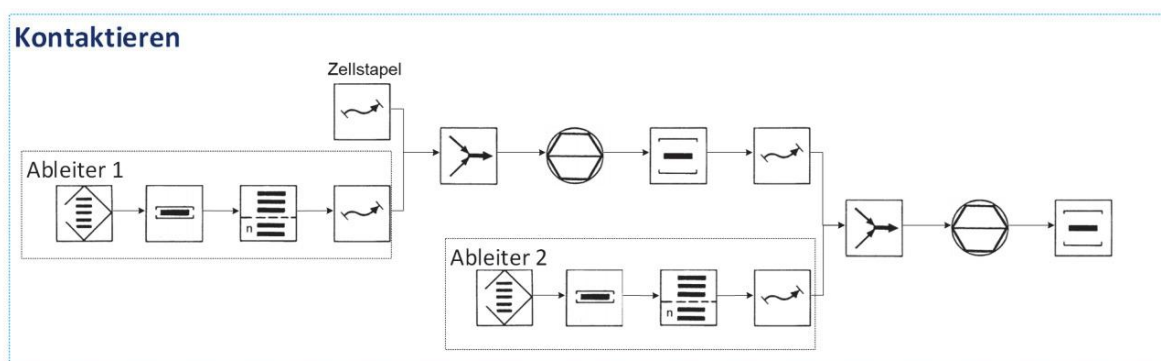


Abbildung 4.14: Funktionsplan des Produktionsmoduls Kontaktieren

Der Heißsiegelprozess hat die Vorteile, dass Folienhersteller meistens Heißsiegelprozessparameter für das Versiegeln der Folie angeben, weiterhin ist die Prozesstechnik in der Regel wenig aufwändig und die Wärmeverteilung im Prozess kann leicht analytisch oder numerisch simuliert werden. Nachteilig ist jedoch die Prozesszeit von bis zu 10 Sekunden, siehe Kapitel 4.1.2.

Ultraschallprozesse sind mit einer Prozesszeit von max. 2 Sekunden deutlich schneller, nachteilig sind jedoch die schlechte Simulierbarkeit, das Fehlen zu Herstellerangaben zu den Produktionsparametern und die damit einhergehende aufwändige Prozesseinstellung durch Versuchsreihen. Weiterhin kann die als Diffusionssperre agierende Aluminiumschicht in der Pouch-Folie durch die Ultraschallschwingung leicht Risse bekommen, was zu höheren Leckraten führen kann.

Da der Heißsiegelprozess bereits in der Zellfertigung etabliert ist, der Aufbau von Prozessverständnis durch Simulationen unterstützt werden kann und keine aufwändige Prozesstechnik benötigt wird, werden Heißsiegelbalken für den statischen Siegelprozess gewählt.

Prozessentwicklung

Da Heißsiegelanlagen inkl. Regelung als Komponenten kommerziell zur Verfügung stehen und in der Zellfertigung Anwendung finden, ist es nicht notwendig, weitere Entwicklungen an diesem Prozess vorzunehmen.

Durch flexibles Drehen und Positionieren der Zelle relativ zu den Siegelbalken vor dem Siegelprozess können sämtliche konkaven, polygonalen Formate gefertigt werden, wobei die Anzahl der Ausrichtungs- und Siegelschritte der Anzahl der zu versiegelnden Kanten entspricht. Runde Kanten können nur durch Annäherung der Geometrie durch beliebig viele gerade Siegelnähte abgebildet werden, die Genauigkeit der Annäherung wird durch die Anzahl der Siegelnähte bestimmt. Es ist also bei dem vorliegenden Konzept nicht oder nicht wirtschaftlich möglich, runde Zellformate zu versiegeln. Ähnlich verhält es sich mit konkaven Ecken. Diese sind zwar theoretisch möglich, indem man die Ecke am Ende der Siegelbalken positioniert, es ergeben sich aber Herausforderungen beim Handling einer solchen Zelle bei der Versiegelung. Diese Fälle werden daher nicht weiter betrachtet.

Um zu überprüfen, ob eine Drehung der unverpackten Zelle Auswirkungen auf den Zellstapel hat, wurden Vorversuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau und der Prüfling

sind in Abbildung 4.15 als Fotografien dargestellt. Dabei wurde ein präparierter, kontaktierter Zellstapel im KIT-Format verwendet, die Pouch-Folie wurde an der Ableiterseite versiegelt, die restlichen drei Seiten bleiben unversiegelt. Der Zellstapel ist in der Regel mit Klebeband (Tapes) fixiert, um ein Rutschen der Blätter zu verhindern. Ein Verrutschen der Blätter kann jedoch bei höherer Krafteinwirkung auch mit Tapes nicht vollständig ausgeschlossen werden. Der Versuch findet mit unfixiertem Zellstapel statt, um zu überprüfen, ob die Drehung überhaupt eine Auswirkung auf den Zellstapel hat. Die Zelle wird nun an zwei Kontaktpunkten mit insgesamt 5 Newton belastet und mit verschiedenen Beschleunigungen auf eine Drehgeschwindigkeit von $180^\circ/\text{s}$ mittels Servomotor beschleunigt. Um die Verschiebung der Elektroden- und Separatorblätter zu überprüfen, wurde ein Teil der Verpackungsfolie entfernt, sodass der Zellstapel darunter sichtbar ist. Nun wird jeweils ein Rechteck aus den Einzelblättern entfernt, damit das jeweils darunter liegende Blatt sichtbar ist. Das auszuschneidende Rechteck wird dabei für jede weitere Schicht etwas kleiner. Durch den sehr hohen Kontrast zwischen den schwarzen Elektroden und den weißen Separatoren lassen sich nun die Kanten klar erkennen. Diese werden vor und nach dem Drehversuch jeweils per Kamerasystem detektiert und die Positionen der Eckpunkte für die ersten drei Schichten ermittelt. Anhand der Verschiebung der Eckpunkte durch die Drehversuche lässt sich also ermitteln, welche Auswirkungen die Drehung bzw. Beschleunigung der teilversiegelten Zelle auf den Zellstapel haben. (Storz et al. 2021, S. 251ff)

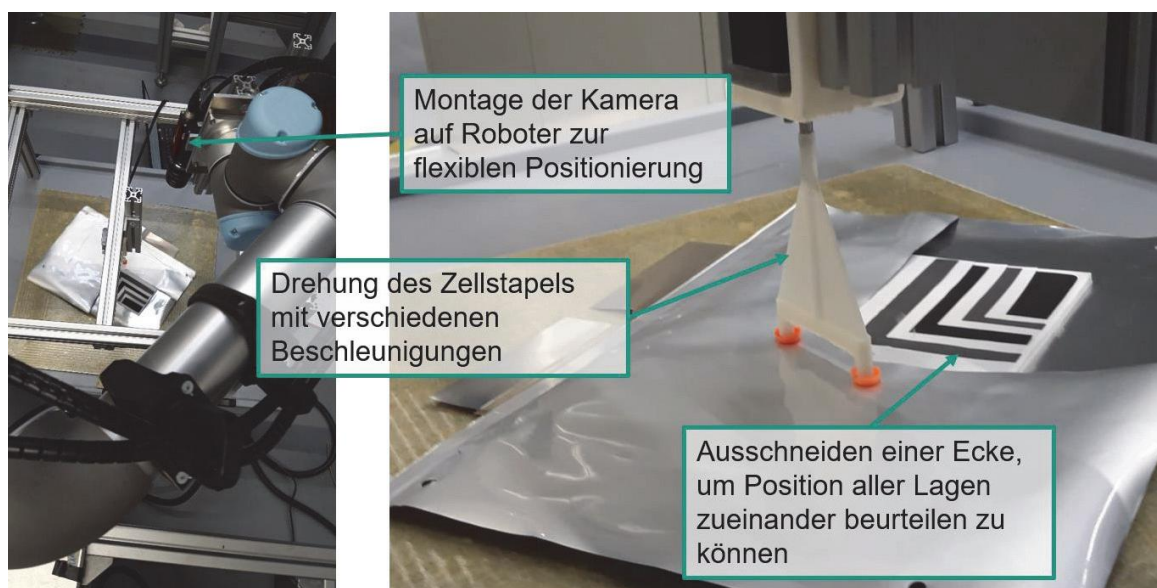


Abbildung 4.15: Aufbau des Drehversuchs (links) und präparierte Zelle mit Werkzeug (rechts)

Die Winkelbeschleunigung wird zwischen ± 90 und $\pm 900^\circ/\text{s}^2$ variiert, wobei bei der größten Beschleunigung bzw. Verzögerung der größte Effekt erwartet werden darf. In Abbildung 4.16 sind die Verschiebungen der Blätter anhand der Abstandsänderung in Pixel der detektierten Ecken der ersten und dritten Lage jeweils zur zweiten Lage für alle Versuche dargestellt.

Die maximale Verschiebung beträgt dabei ca. 1,5 Pixel, was in der verwendeten Konfiguration ca. 0,08 mm entspricht (Storz et al. 2021, S. 252). Werden das Rauschen in den Bildsignalen und die Unsicherheit der Lokalisierung der Eckpositionen durch die Kantendetektion betrachtet, ergibt sich eine Messunsicherheit von ± 1 Pixel. Dazu wird die Kantendetektion mehrfach (5 Messungen) ausgeführt und die Eckposition bestimmt, die maximale Abweichung vom Mittelwert wird als Messtoleranz angenommen. Die gemessene Verschiebung liegt also exakt im Bereich der Messunsicherheit. Damit ist wahrscheinlich, dass die Drehung der Zelle bei niedrigen Beschleunigungen keine Auswirkungen auf den Zellstapel hat, die Verschiebung ist aber sicherlich $< 0,1$ mm. Bei einer Drehung würde eine Akkumulation der Verschiebung entgegen der tangentialen Beschleunigung erwartet werden. Dies ist aber eindeutig nicht der Fall, die Abweichung steigt und sinkt scheinbar zufällig. Auch das weist stark darauf hin, dass keine Verschiebung stattfindet. Da der Stapel nach dem Stapelprozess eine Genauigkeit von

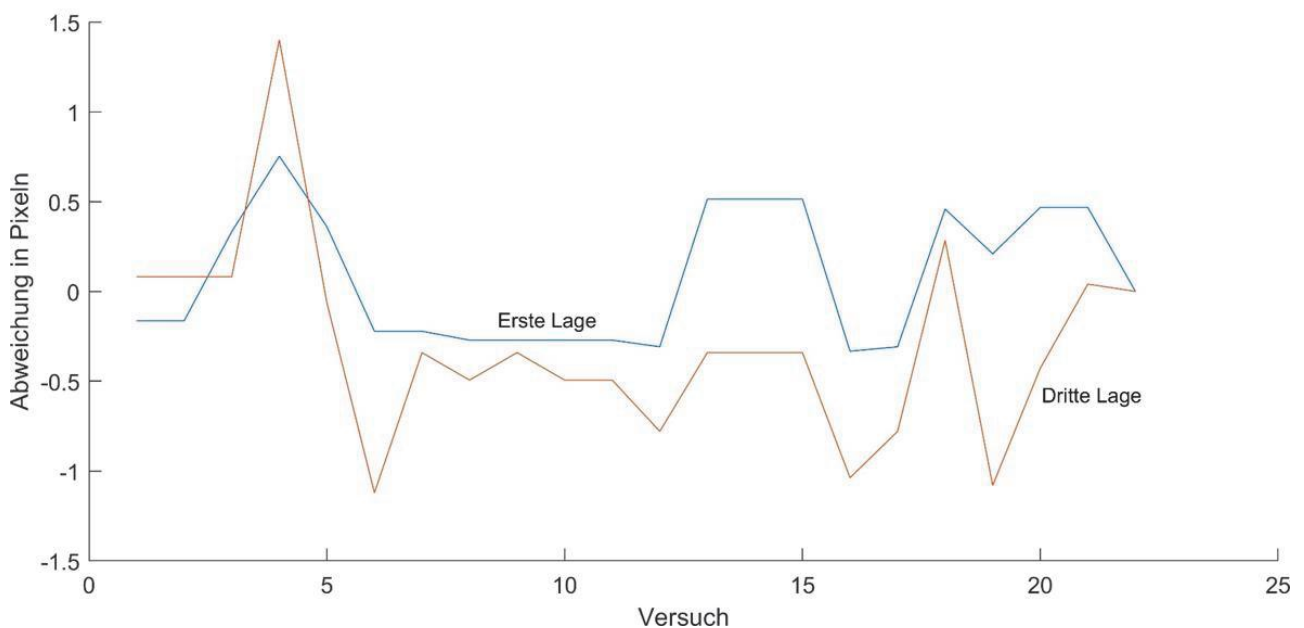


Abbildung 4.16: Abstandsänderung der Ecken der ersten Lage (blau) und der dritten Lage (orange) zur Ecke der zweiten Lage durch Drehversuche (Storz et al. 2021, S. 252)

$\pm 0,2$ mm aufweist, aber im Produkt eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm gewählt wurde (siehe Kapitel 3.3), wird hier eine maximale Verschiebung von $\pm 0,1$ mm akzeptiert.

Die Zelle kann also gedreht werden, sobald die Ableiterseite versiegelt ist, ohne dass relevante Qualitätseinbußen im Stapel erwartet werden müssen.

Funktionsplan

In Abbildung 4.17 ist der Funktionsplan für das Verpackmodul dargestellt. Der Werkstückträger öffnet, parallel wird das Folienblatt aus dem Speicher entnommen und zum Stapel geführt. Die Pouch Folie wird auf den kontaktierten Stapel im Werkstückträger positioniert, anschließend schließt der Werkstückträger und dreht sich um 180° um die eigene Achse. Nun wird das zweite Folienblatt dem Speicher entnommen und analog zum ersten auf dem Zellstapel abgelegt, sodass der Stapel sich nun zwischen den Verpackungsfolien befindet. Der geschlossene Werkstückträger bewegt sich nun zu den Siegelbalken und der Fügeprozess der Ableiterseite statt. Der Werkstückträger begibt sich zur Position am Drehmodul und öffnet, daraufhin wird die Zelle vom Drehmodul gegriffen, gedreht und positioniert. Der Prozess des Siegelns und der Drehung der Zelle wird analog n-fach wiederholt, abhängig vom Format der zu fertigenden Zelle.

Die sich aus dem Funktionsplan abgeleiteten Hauptfunktionen sind das Fügen der Pouch-Folien sowie das Drehen und Positionieren der Zelle. Die Nebenfunktionen sind das Speichern und Positionieren der Pouch-Folie. Für diese Funktionen werden Lösungen in Kapitel 4.4.3 abgeleitet.

4.4 Umsetzung und Validierung

Im vorliegenden Kapitel mit den jeweiligen Unterkapiteln werden die vorher entwickelten Prozesse, Anforderungen und Funktionen der einzelnen Produktionsmodule in technische Lösungen übersetzt. Dazu werden morphologische Kästen mit entsprechend angepassten Bewertungskriterien verwendet. Das Ergebnis der Anlagenkon-

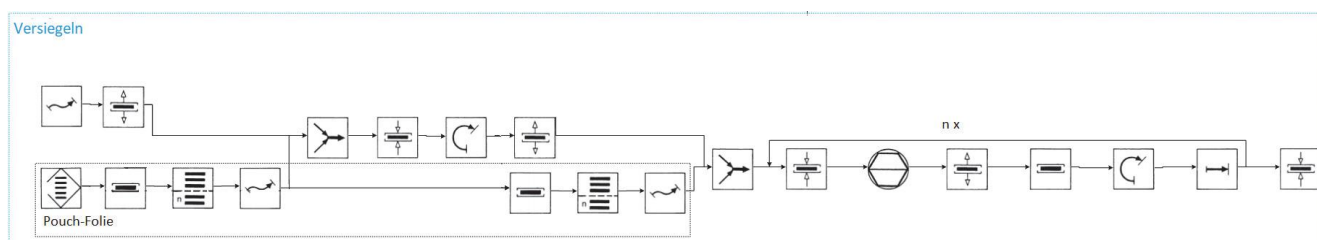


Abbildung 4.17: Funktionsplan des Verpackmoduls nach VDI 2860

struktionsbeschreibung wird beschrieben, abschließend werden Versuche zur Validierung durchgeführt. Im Anschluss wird in Kapitel 4.4.4 die Umsetzung der Gesamtanlage als Roboterzelle beschrieben. Dabei wird der Fokus auf den Gesamtprozessablauf und die Steuerungsarchitektur gelegt.

4.4.1 Produktionsmodul Stapeln

Die technische Umsetzung des Stapelmoduls wird in diesem Kapitel beschrieben, dabei wird (A_Vogt 2019) zusammengefasst. In Tabelle 4.9 wird der morphologische Kasten zu den Haupt- und Nebenfunktionen des Stapelmoduls dargestellt. Im Folgenden wird auf die Bewertung und Lösungsauswahl der einzelnen Funktionen eingegangen.

Umsetzung

Die Funktion „Einzelblatt speichern“ wird als Magazin umgesetzt, da die Einzelblätter geordnet gespeichert werden und transportiert werden können müssen. Da der Stapelungsprozess in das Magazin sowie die Entnahme der Blätter vom Prozess gleich sein sollen, werden „First In, First Out“-Magazine ausgeschlossen und damit die Lösung als „Last In, First Out“-Magazin (LIFO-Magazin) festgelegt. Es wird unbedingt eine Federung benötigt, die eine Beschädigung des Greifers bei Kontakt mit dem Magazin verhindert. Dabei kann diese Federung in der Greiferhalterung oder im Magazin selbst vorgesehen werden. Das Magazin kann zudem an das jeweilige Format des Blattes angepasst werden, so dass nur dieses anhand der Form des Magazins positionsgetreu gespeichert werden kann (Formschluss) und bei Formatwechsel umgerüstet werden muss, oder das Magazin wird als universelles Magazin ausgeführt. Das universelle Magazin kann dabei eine Vielzahl an Formaten der Einzelblätter positionsgetreu speichern, die Position wird dabei über Kraftschluss gehalten. Es ergeben sich also vier Umsetzungsalternativen.

Da bereits feststeht, dass ein gewölbter Catenary-Greifer zum Einsatz kommen wird, wird das Magazin im Zusammenhang der Interaktion zwischen Greifer und Magazin entwickelt. Ein federndes Magazin hat dabei den Vorteil, dass der Greifer gefahrlos auf das Magazin fahren kann und Kraft auf den Stapel ausüben kann, sodass dieser in der Folge fixiert ist. Ein weiterer Vorteil eines gefederten Magazins ist die Positionierung des oberen Blatts an der immer gleichen Stelle: Da die Einzelblätter durch die Federn gegen die Niederhalter gedrückt werden, befindet sich das oberste Blatt immer in Kontakt mit den Niederhaltern und somit an der gleichen Stelle, bis der Magazinstapel vom Greifer nach unten gedrückt und durch diesen fixiert wird. Damit ist die Anfahrt des

Greifers auf das Magazin immer identisch und unabhängig vom Füllstand des Magazins, die Position, an dem der Greifer das Magazin kontaktiert, bleibt unverändert.

Tabelle 4.9: Morphologischer Kasten des Stapelmoduls

Funktion	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3	Alternative 4
<i>NF: Einzelblatt speichern</i>	Federndes, universelles Magazin	Formatangepasstes, ungedecktes Magazin	Formatangepasstes, federndes Magazin	Universelles, ungefedertes Magazin
<i>HF: Einzelblatt greifen</i>	Catenary Greifer mit Coanda-Ejektoren und zwei Kammern	-	-	-
<i>HF: Einzelblatt transportieren</i>	Vertikal-knickarm-roboter	Horizontal-knickarm-roboter	Portalsystem (kartesisches Linearsystem)	Linear-Kompaktmodul (Pick and Place Einheit)
<i>HF: Einzelblatt ablegen</i>	Federnde Ablage	Federnder Greifer	-	-
<i>NF: Zellstapel fixieren</i>	Flexibel anpassbare Niederhalter	universell passende Niederhalter	-	-

Formatangepasste Magazine speichern die Einzelblätter über Formschluss. Das heißt, dass der Magazinstapel von den seitlichen Halterungen auf voller Höhe gehalten werden muss und der Greifer zwingend kleiner sein muss als das zu greifende Format, damit der Greifer beim Ansaugprozess nicht mit den Halterungen kollidiert und Kontakt mit dem obersten Blatt im Magazin herstellen kann. Bei universellen Magazinen hält eine Kraft zwischen Niederhaltern und Blattstapel die Einzelblätter in Position. Diese Kraft erfolgt dabei senkrecht zur Blattoberfläche. Es sind also keine seitlichen Halterungen o.ä. notwendig, damit muss lediglich gewährleistet werden, dass die Niederhalter nicht mit dem Greifer kollidieren. Dazu muss die Anordnung der Niederhalter auf den Greifer abgestimmt werden und eine geeignete Aktorik vorgesehen werden, welche die Niederhalter beim Ansaugvorgang so positioniert, dass diese nicht mit dem anzuhebenden Einzelblatt kollidieren. Diese technische Lösung lässt sich sehr gut mit einem gefederten Magazin verknüpfen, da hier die gefederte Ablagefläche die Kraft der Niederhalter auf den Magazinstapel induziert und die Niederhalter damit so ausgeführt werden können, dass sie sich nicht vertikal bewegen. Durch eine einfache Rotation der

Niederhalter in der horizontalen Ebene können diese also die gesamte Blattfläche freigeben. Aus den genannten Gründen wird ein gefedertes, universelles Magazin zur weiteren Entwicklung ausgewählt. In Abbildung 4.18 ist ein Modell des entwickelten Magazins zu sehen. Die Niederhalter werden dabei durch den Greifer betätigt: Fährt der Greifer auf das Magazin, so betätigt dieser durch mechanischen Kontakt automatisch die Mechanik für die schwenkbaren Niederhalter positionsgesteuert zum richtigen Zeitpunkt. Dadurch ist keine weitere Peripherie nötig und ein sicheres Speichern und Aufnehmen der Einzelblätter gewährleistet. In Abbildung 4.19 ist die praktische Umsetzung eines gefüllten Anodenmagazins dargestellt.

Das Greifen der Einzelblätter wurde bereits in der Prozessentwicklung in Kapitel 4.3.1 diskutiert. Daher wird das Greifen per Catenary-Greifer mit zwei unabhängig aktivierbaren Kammern mit jeweils einem Coanda-Ejektor gewählt. In Abbildung 4.20 ist die finale Version des Greifers dargestellt.

Für den Transport des Blattes wird eine geeignete Kinematik ausgewählt. Dabei muss das Blatt frei translatorisch bewegbar sein und in der Blattebene rotieren können. Es sind also mind. 4 Freiheitsgrade der Bewegung erforderlich. Nach einer Vorauswahl werden vier- bis sechsachsige Vertikalknickarmroboter, Horizontalknickarmroboter (SCARA), Portalsystem sowie Linear-Kompaktmodul verglichen und bewertet. Bewertet werden die Systeme hinsichtlich Produktivität, Qualität und Komplexität der Umsetzung. Die Übersicht der Bewertung ist in Tabelle 4.10 gegeben.

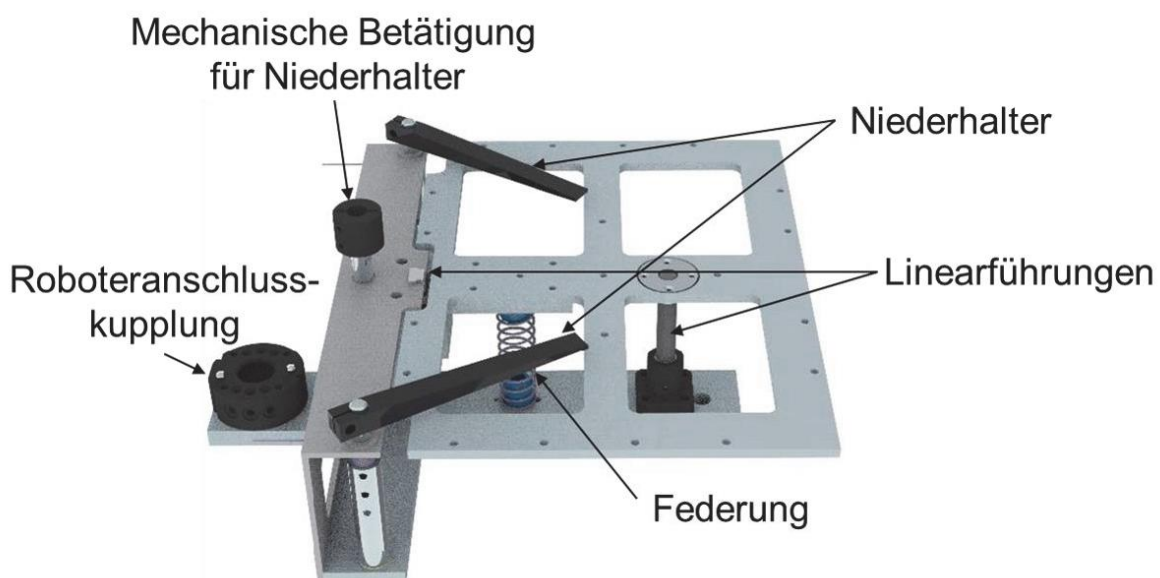


Abbildung 4.18: Modell des Einzelblattmagazins



Abbildung 4.19: Fotografie des verwendeten Anodenmagazins in der Einbausituation

Die Produktivität wird für Vertikalknickarmroboter als ausreichend bewertet. Es ist zu erwarten, dass mit einer seriellen Kinematik mit sechs Freiheitsgraden die geforderte Stapelgeschwindigkeit ohne weitere technische Optimierungen nicht zu erreichen ist. Die geforderte Qualität wird erreicht, Vertikalknickarmroboter erreichen in der Regel eine Wiederholgenauigkeit von ca. 0,1 mm ohne weitere technische Optimierungen. Daher wird die zu erwartende Qualität mit gut bewertet. Die Komplexität der Umsetzung wird als befriedigend bewertet. Zwar verfügen Industrieroboter über standardisierte Steuerungsschnittstellen zur Kommunikation mit der Leitsteuerung, durch die sechs

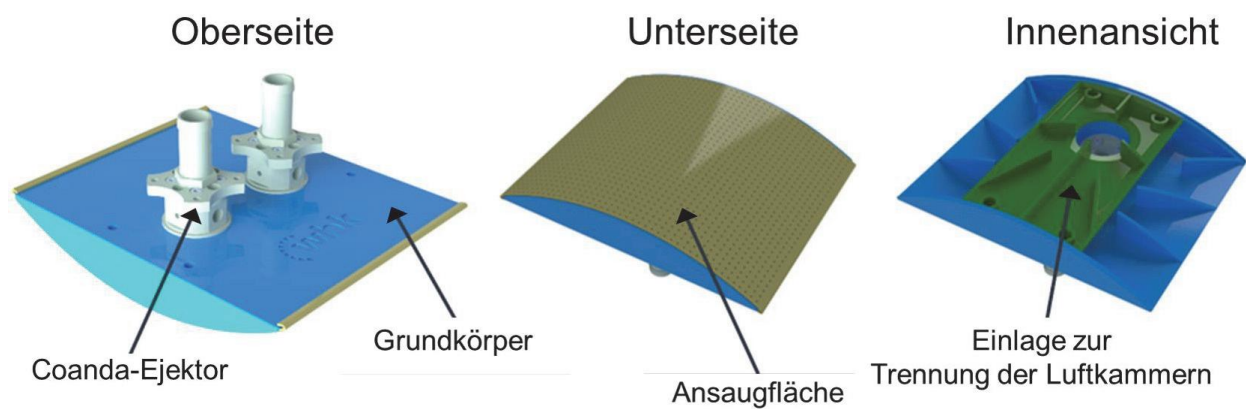


Abbildung 4.20: Finaler, im Stapelmodul verwendeter Catenary Greifer in verschiedenen Ansichten

Tabelle 4.10: Bewertung der Umsetzungsalternativen der Funktion „Einzelblatt transportieren“

	Vertikalknickarmroboter	SCARA	Portalsystem	Linearkompaktmodul
Produktivität	-	++	+	++
Qualität	+	+	+	++
Umsetzbarkeit	o	++	-	--
Gesamt	o	++	o	+

Freiheitsgrade der Kinematik wird die Programmierung jedoch aufwendiger, als dies nötig wäre. Der Prozess benötigt lediglich vier Freiheitsgrade, drei translatorische und einen rotatorischen.

Horizontalknickarmroboter (SCARA) weisen hohe Verfahrgeschwindigkeiten auf und werden in hochproduktiven Pick-and-Place-Anlagen verwendet. Die Produktivität wird als sehr gut bewertet, es wird erwartet, dass die geforderte Produktionsgeschwindigkeit erreicht wird. Die Qualität der SCARA wird als gut bewertet, da Wiederholgenauigkeiten von typischerweise 0,01 – 0,1 mm erreicht werden. Kommerziell verfügbare SCARA verfügen über standardisierte Steuerungsschnittstellen, die Programme sind auf Pick-and-Place-Anwendungen spezialisiert. Weiterhin ist die Aufstellfläche gering. Daher wird die Komplexität der Umsetzung mit sehr gut bewertet. (A_Vogt 2019, S.73ff)

Für Portalsysteme wird die Produktivität mit gut bewertet, da diese Systeme durch geeignete Programmierung eine optimierte Bahnführung zulassen und sich somit die Verfahrdauer minimieren lässt. Die Qualität wird ebenfalls als gut bewertet, es existieren kommerziell verfügbare Systeme, welche die geforderte Wiederholgenauigkeit erreichen. Eine einfache Umsetzung ist mit einem Portalsystem jedoch nicht möglich. Da mindestens zwei unabhängig zu verfahrenene Systeme benötigt werden, wird der Aufbau sehr komplex – entweder werden zwei unabhängige Systeme benötigt, welche sich jedoch in ihrem Arbeitsraum zur Blattablage überschneiden, oder aber es wird ein System mit zwei unabhängig voneinander beweglichen Greifern benötigt. Gemeinsam mit der großen Aufstellfläche für Portalsysteme ergibt sich damit lediglich eine als ausreichend bewertete Umsetzbarkeit. (A_Vogt 2019, S.73ff)

Linearkompaktmodule sind ebenfalls für Pick-and-Place Anwendungen konstruiert und sind hochgenau und sehr schnell beweglich. Die Produktivität sowie Qualität wird jeweils mit sehr gut bewertet. Da Linearkompaktmodule jedoch lediglich zwei Freiheitsgrade zulassen, wie oben beschrieben aber vier nötig sind, wäre die Umsetzung des

Einzelblattstapeln mit Linearkompaktmodulen nur mit hohem zusätzlichem Aufwand zur Installation von zusätzlichen Achsen möglich. Daher wird die Umsetzbarkeit als mangelhaft bewertet. (A_Vogt 2019, S.73ff)

Die Bewertung zeigt, dass SCARA-Systeme die beste Alternative zum Transport der Einzelblätter darstellt. Nach Lastanalysen anhand des Greifergewichts und der Federkraft der Magazine sowie Bauraum- und Genauigkeitsanalysen wurden zwei OMRON i4L-450L Roboter ausgewählt. Dabei ist ein Roboter mit zwei Greifern ausgestattet – jeweils ein Greifer für Anode und Kathode, während der zweite SCARA mit einem Greifer für die Separatoreinzelblätter ausgestattet ist. Damit wird eine Querkontamination vermieden.

Aus der Entscheidung für gefederte Magazine folgt die Entscheidung für eine federnde Ablage, da hier sonst federnde Greifer notwendig wären. Eine federnde Stapelablage hat sämtliche Vorteile der federnden Magazine. Das oberste Blatt befindet sich immer an der selben vertikalen Position, weshalb der Ablagevorgang unabhängig von der Stapelhöhe immer gleich abläuft. Als Federmechanismus wurde ein pneumatischer Zylinder gewählt, welcher, abhängig vom beaufschlagten Luftdruck, hinsichtlich der Steifigkeit anpassbar ist. Weiterhin ist so die Position der Stapelablage zwischen einer oberen und unteren Position wählbar, was für die Übergabe des Zellstapels an den zentralen Handlingroboter bzw. dessen Greifer von Vorteil ist. In Abbildung 4.21 ist die Stapelablage ohne Niederhalter dargestellt. Die Aussparungen in der Stapelablage sind zur Entnahme des Zellstapels durch den Werkstückträger am zentralen Handlingroboter notwendig. (A_Vogt 2019, S.77ff)

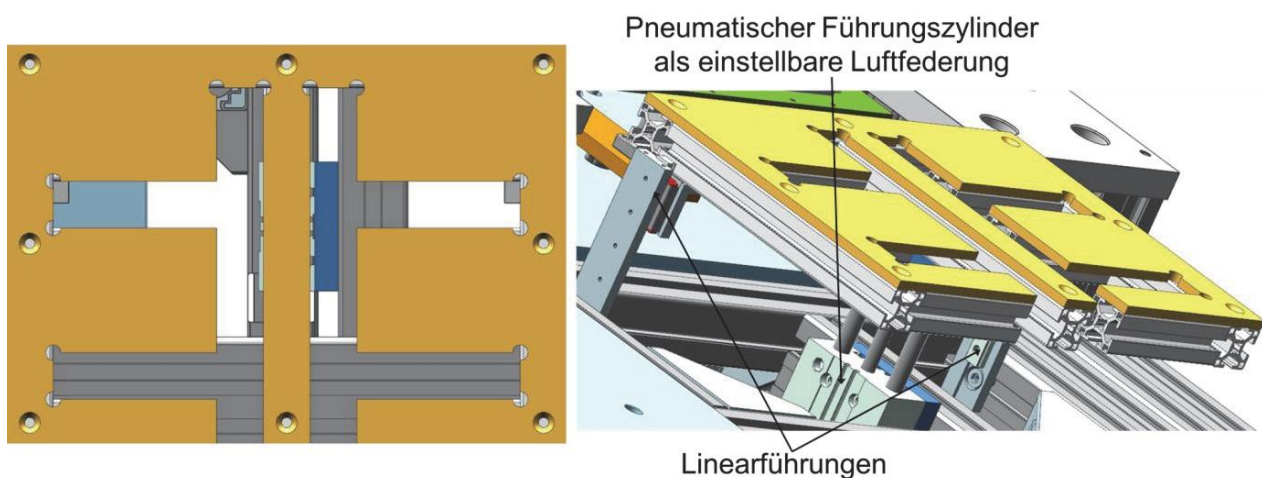


Abbildung 4.21: Stapelablage in der Draufsicht (links) und Schrägansicht (rechts) im Anlagenkontext. Einige Bauteile wurden für die bessere Darstellung ausgeblendet

Für die Funktion „Zellstapel fixieren“ werden die Alternativen „flexibel anpassbare Niederhalter“ und „universell passende Niederhalter“ qualitativ verglichen. Flexibel anpassbare Niederhalter haben den Vorteil, dass die Niederhaltepunkte für jedes Format geändert werden können und damit eine optimierte Lasteinleitung hinsichtlich Verformung des Stapels realisiert werden kann. Die Umsetzung ist jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden: Werden vier Niederhalter betrachtet, so ist es notwendig, für jeden Niederhalter drei Freiheitsgrade zu steuern, was zu zwölf zusätzlichen Achsen führt. Bei universell passenden Niederhaltern sind die Lasteinleitungspunkte nicht an das Format angepasst. Der Niederhaltevorgang wird jedoch deutlich einfacher in der Umsetzung und läuft immer identisch ab. Aus den genannten Gründen werden universal nutzbare Niederhalter für die Anwendung ausgewählt. In Abbildung 4.22 ist die Stapelablage mit Niederhaltern und Einzelblattgreifer zu sehen. Als Aktorik für die Niederhalter wurden pneumatische Klemmschwenkzylinder gewählt, diese ermöglichen ein Einschwenken der Niederhalter mit anschließendem Vertikalhub, so dass keine Relativbewegung zwischen Zellstapel und Niederhalter beim Einschwenken entsteht. Mit diesem Mechanismus ist es möglich, die Niederhalter möglichst nah am Greifer zu positionieren und trotzdem genügend Platz für den Hub des Greifers und der Stapelablage zu ermöglichen, ohne dass eine Kollision zwischen Greifer und Niederhalter stattfindet. Dies ist vor allem bei kleinen Blattformaten wichtig, da diese sonst nicht von den Niederhaltern erfasst werden könnten, wenn der Einleitungspunkt zu weit von der Greifermitte entfernt wäre. (A_Vogt 2019, S.77ff)

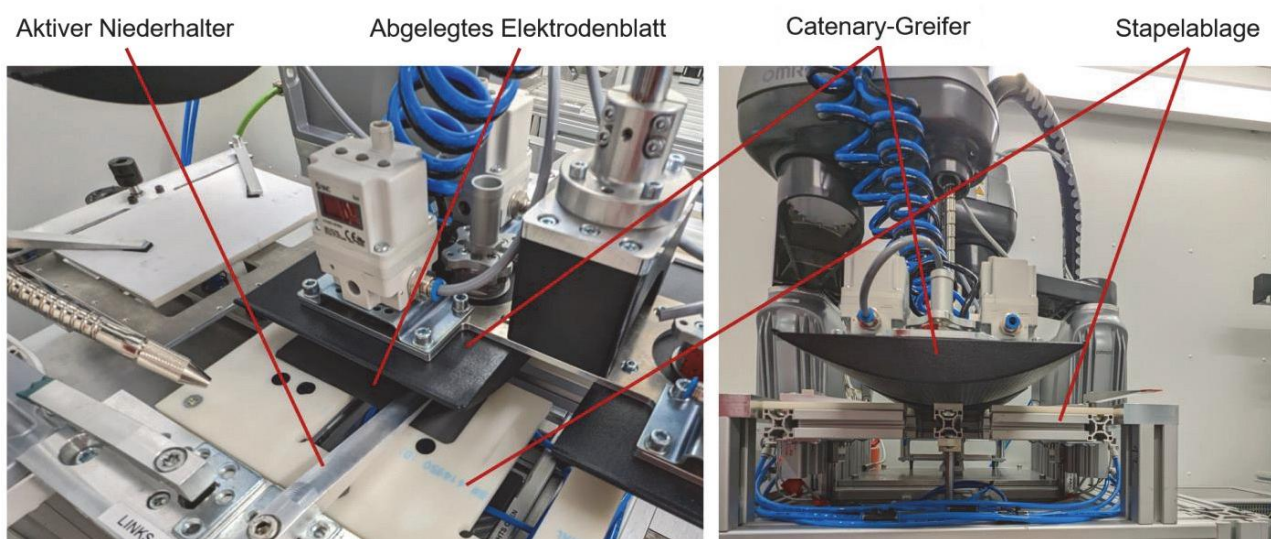


Abbildung 4.22: Stapelablage mit Greifer beim Ablegevorgang in der Schrägansicht (links) und Vorderansicht (rechts). Zu sehen ist eine abgelegte Elektrode mit aktivierten Niederhaltern

In Abbildung 4.23 ist das fertig konstruierte Stapelmodul im Modell sowie als Fotografie zu sehen. Zur Messung der Stapelgenauigkeit wird über der Stapelablage ein Stereokamerasystem installiert. Dessen Funktionsweise und Validierung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, hier sei auf (Storz et al. 2021) verwiesen.

Zur Validierung der Funktion des Einzelblattstapelmoduls werden Stapelversuche durchgeführt und die Stapelgenauigkeit sowie die Produktionsgeschwindigkeit gemessen. Dazu werden die Positionen mehrerer Anoden- und Kathodenblätter nach deren Ablage jeweils detektiert, Separatorpositionen werden zur Validierung nicht erfasst, da deren Ablagegenauigkeit keinen Einfluss auf die Zellqualität hat, sofern diese die Elektroden vollständig bedecken. Da in dieser Arbeit eine Lagetoleranz von ± 2 mm durch das Separatorformat gegeben ist (Separator ist umlaufend 2 mm größer als das Anodenblatt), ist die Stapelgenauigkeit der Separatoren unkritisch. Die Ergebnisse der Stapelversuche sind in Abbildung 4.24 dargestellt.

Versuch 1 wurde mit 50 % der Maximalgeschwindigkeit der SCARAs durchgeführt, Versuch 2 bei 100 %. Die Pfeile zeigen dabei von der jeweiligen Eckposition der Elektrode

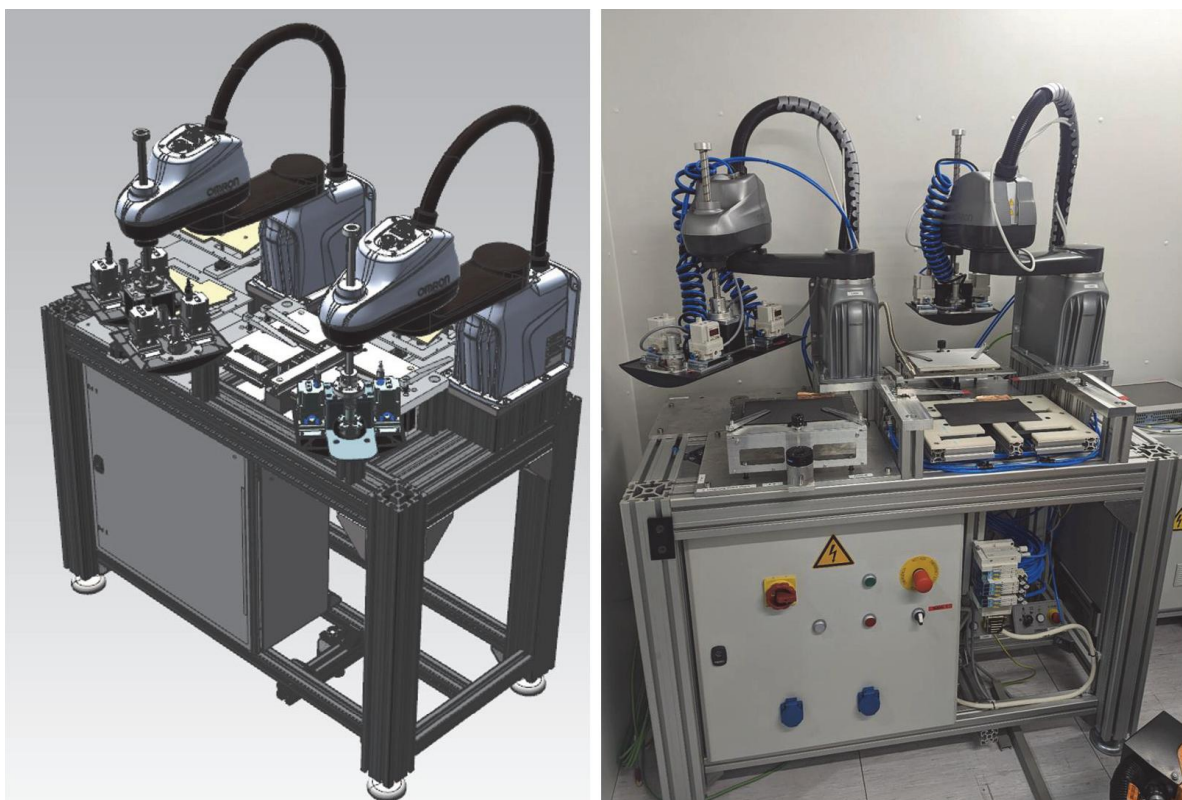


Abbildung 4.23: Stapelmodul als Modell (links) und Fotografie (rechts)

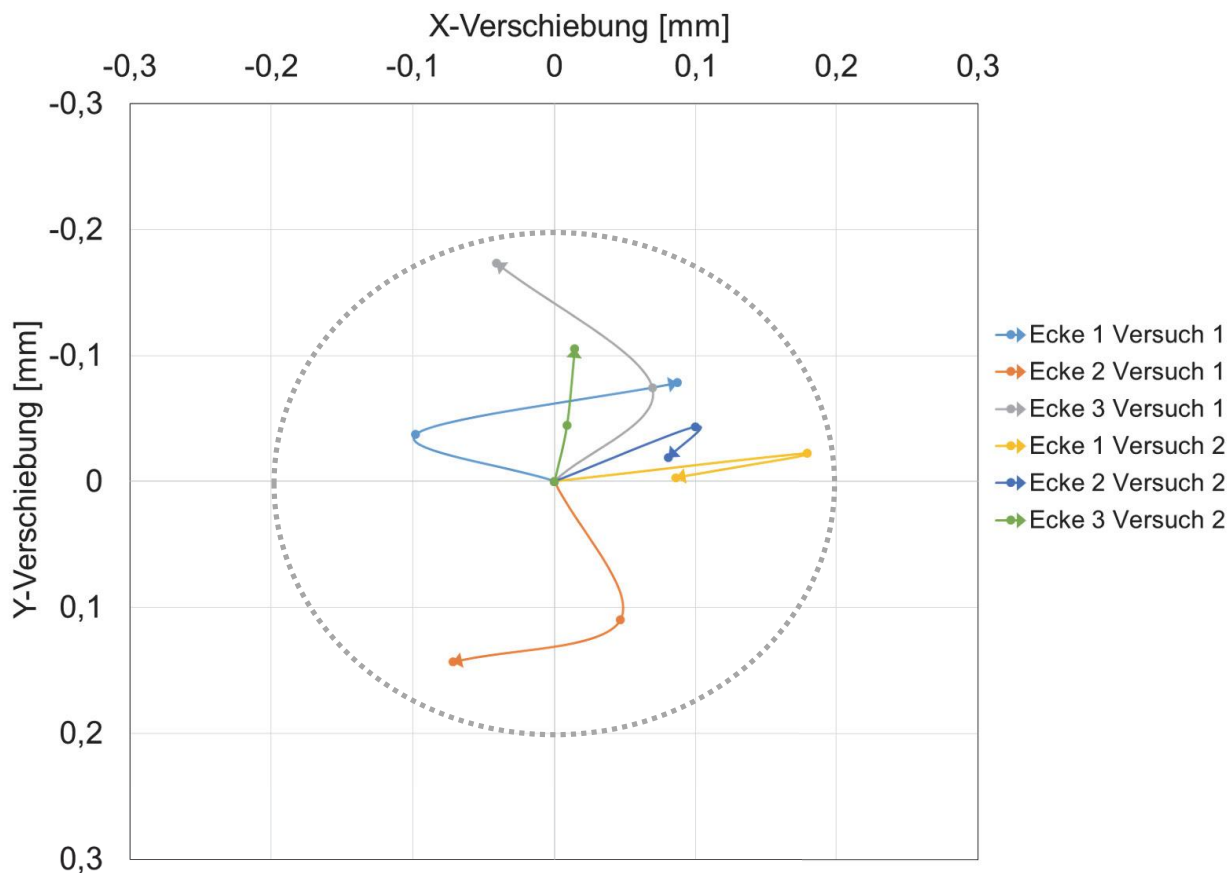


Abbildung 4.24: Darstellung der Verschiebung der Ecken aufeinander gestapelter Anodenblätter zur Ermittlung der Stapelgenauigkeit

zu Eckposition der nächsten abgelegten Elektrode (hier wurden nur Anoden verwendet). Als Ursprungsposition gilt dabei immer die Position der zuerst abgelegten Anode, auf welche sich die Positionsabweichung der weiteren Blätter bezieht. Es werden für jedes abgelegte Blatt die Positionen von drei Ecken gemessen. Aus dem maximalen Abstand der Ecken zueinander lässt sich eine Stapelgenauigkeit von 0,19 mm feststellen bei einer Produktionsgeschwindigkeit von ca. 3,8 Sekunden pro Blatt. Damit erfüllt die Funktion des Produktionsmoduls die in Kapitel 4.1 hergeleiteten Anforderungen. Die ausführliche Bewertung wird in Kapitel 4.5.1 behandelt.

4.4.2 Produktionsmodul Kontaktieren

In Kapitel 4.3.2 wurde der Ultraschallprozess als beste Alternative zum Kontaktieren der Zellen identifiziert. Gemeinsam mit dem Hersteller Herrmann Ultraschall GmbH wurde das Gerät HiS VARIO B 4800 identifiziert, welche alle Anforderungen erfüllt. Vom Hersteller wurde dies anhand von Schweißproben validiert. Die weitere Auslegung der

Peripherie des Kontaktiermoduls wie Greifer oder sonstige Aktorik ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und ist in (A_Krey 2020) beschrieben. Die Bereitstellung der in Magazinen gespeicherten Ableiterbleche erfolgt mittels Vakuumbreifer, welcher von einem Linear-kompaktmodul mit zwei Freiheitsgraden geführt wird. Damit sind alle Anforderungen an das Kontaktiermodul erfüllt. In Abbildung 4.25 ist das fertige Kontaktiermodul als Modell sowie als Fotografie dargestellt.

Es fanden Versuche zur Ermittlung der Schweißparameter für die Anoden- sowie Kathodenableiterbleche bei einer Stapelhöhe von jeweils 3 Elektroden statt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A.1 zusammengefasst.

4.4.3 Produktionsmodul Verpacken

Im vorliegenden Kapitel wird auf die grundlegenden Ergebnisse des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses eingegangen. In Tabelle 4.11 ist der morphologische Kasten für die Haupt- und Nebenfunktionen gegeben.

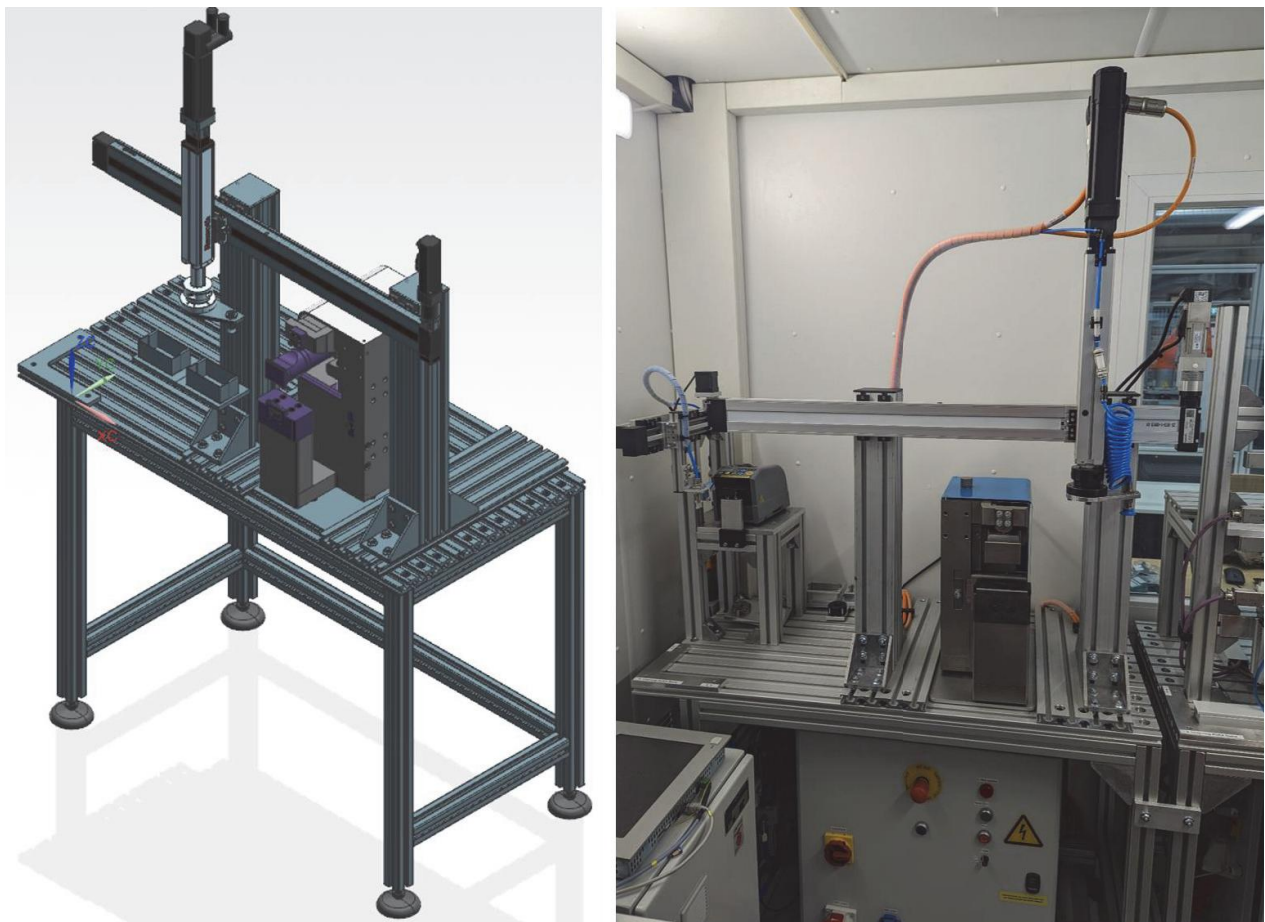


Abbildung 4.25: Kontaktiermodul als Modell (links) und Fotografie (rechts)

Tabelle 4.11: Morphologischer Kasten des Verpackmoduls

Funktion	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
<i>HF: Folien fügen</i>	Heißsiegeln mit pneumatischer Druckbeaufschlagung	Ultraschallsiegeln	
<i>HF: Zelle drehen</i>	Im Werkstückträger	Im Produktionsmodul	Werkzeug drehen
<i>HF: Zelle positionieren</i>	Durch zentralen Handlingroboter	Durch Produktionsmodul	
<i>NF: Folie speichern</i>	Rollenware	Einzelblätter	
<i>NF: Folie positionieren</i>	Flexibel	Vorgegebene Position	

Die wichtigste Hauptfunktion besteht darin, die Folien gasdicht zu fügen. Wie in der Prozessauswahl in Kapitel 4.3.3 beschrieben, bestehen die Alternativen aus dem Heißsiegeln, wobei der nötige Anpressdruck pneumatisch aufgebracht wird, und dem Ultraschallsiegeln. Aus den in Kapitel 4.3.3 genannten Gründen wird der Heißsiegelprozess bevorzugt.

Die nächste Hauptfunktion ist das Drehen der Zelle zur Umorientierung dieser relativ zum Siegelwerkzeug. Dabei ist es möglich, die Zelle im Werkstückträger des zentralen Roboters zu drehen, die Zelle aus dem Werkstückträger zu entnehmen und im Verpackmodul zu drehen oder aber die Zelle aus dem Werkstückträger zu entnehmen und das Werkzeug, ergo die Siegelbalken, relativ zur feststehenden Zelle zu drehen. Die erste Alternative erlaubt es, die Zelle im Werkstückträger zu belassen. Die anderen Umsetzungsalternativen machen es dagegen notwendig, den Zellstapel zu entnehmen und dem Handling des Verpackmoduls sicher zu übergeben. Da sich sonst keine Vor- oder Nachteile hinsichtlich Flexibilität oder Qualität bei den verschiedenen Alternativen ergeben, wird die Drehung der Zelle im Werkstückträger des zentralen Roboters vorgenommen.

Daraus ergibt sich die Hauptfunktion der Positionierung der Zellen relativ zum Siegelwerkzeug. Da sich die Zelle also ohnehin während des Drehprozesses im Greifer des zentralen Handlingroboters (Werkstückträger) befindet, bietet sich eine Positionierung dieser durch den zentralen Handlingroboter an. Dadurch kann auf eine Entnahme der Zelle durch das Verpackmodul gänzlich verzichtet werden.

Die Verpackungsfolie kann entweder als Rollenware oder in Form von Einzelblättern gespeichert werden. Die Produktivität bei der Speicherung als Rollenware wird als etwas höher bewertet, da dadurch sehr viel Material gespeichert werden kann im Gegensatz zu Einzelblattmagazinen und dadurch muss ein Austausch weniger oft stattfinden. Die Umsetzbarkeit dieser Lösung wird jedoch deutlich schlechter bewertet, da ein kompliziertes Bahnführungs-, Schneid- und Handlingsystem benötigt wird. Aufgrund dessen wird die Verpackungsfolie in vorher zugeschnittenen Einzelblättern in einem Magazin gespeichert.

Die Positionierung der Verpackungsfolien auf dem Zellstapel kann entweder positionsflexibel erfolgen oder durch die Bereitstellung auf einer nicht anpassbaren Position. Auch diese Funktion ist effektiv an die vorherigen Varianten geknüpft – da festgelegt wurde, dass die Folie als Einzelblätter gespeichert wird und die Zelle während des Verpackungsvorgangs im Werkstückträger des zentralen Handlingroboters verbleibt, ist eine flexible Positionierung der Verpackungsfolie auf dem Zellstapel nicht nötig bzw. wird diese vom zentralen Handlingroboter übernommen. Dadurch lässt sich die Umsetzung gegenüber einem vollflexiblen Positioniersystem für die Verpackungsfolieneinzelblätter stark vereinfachen.

Es lässt sich nun das Verpackmodul in drei wesentliche Komponenten unterteilen: Die Siegelanlage, die Vorrichtung zum Drehen der Zelle im Werkstückträger sowie die Komponente zur Speicherung und Bereitstellung der Verpackungsfolie. Da jedoch sowohl zum Drehen der Zelle als auch zur Bereitstellung der Folie jeweils in den Werkstückträger gegriffen werden muss, werden diese Komponenten zu einer integriert und bilden gemeinsam das sogenannte Drehmodul. Der Prozess der Positionierung der Verpackungsfolie auf dem Zellstapel und der Drehprozess sind in Abbildung 4.26 schematisch dargestellt.

Zur Entwicklung der Siegelanlage findet zunächst die Auswahl der Heißsiegelbalken statt. Diese sind kommerziell von einer Vielzahl an Herstellern verfügbar, die Produkte unterscheiden sich dabei nur marginal. Die in Kapitel 2.3.2 erwähnte Firma Watttron bietet jedoch auch Siegelbalken mit ihrer cera2heat genannten Technologie an, diese haben den Vorteil, dass sie über die gesamte Länge der Balken ein anpassbares Temperaturprofil erlauben. Dabei sind die einzelnen, in ihrer Temperatur regelbaren Ab-

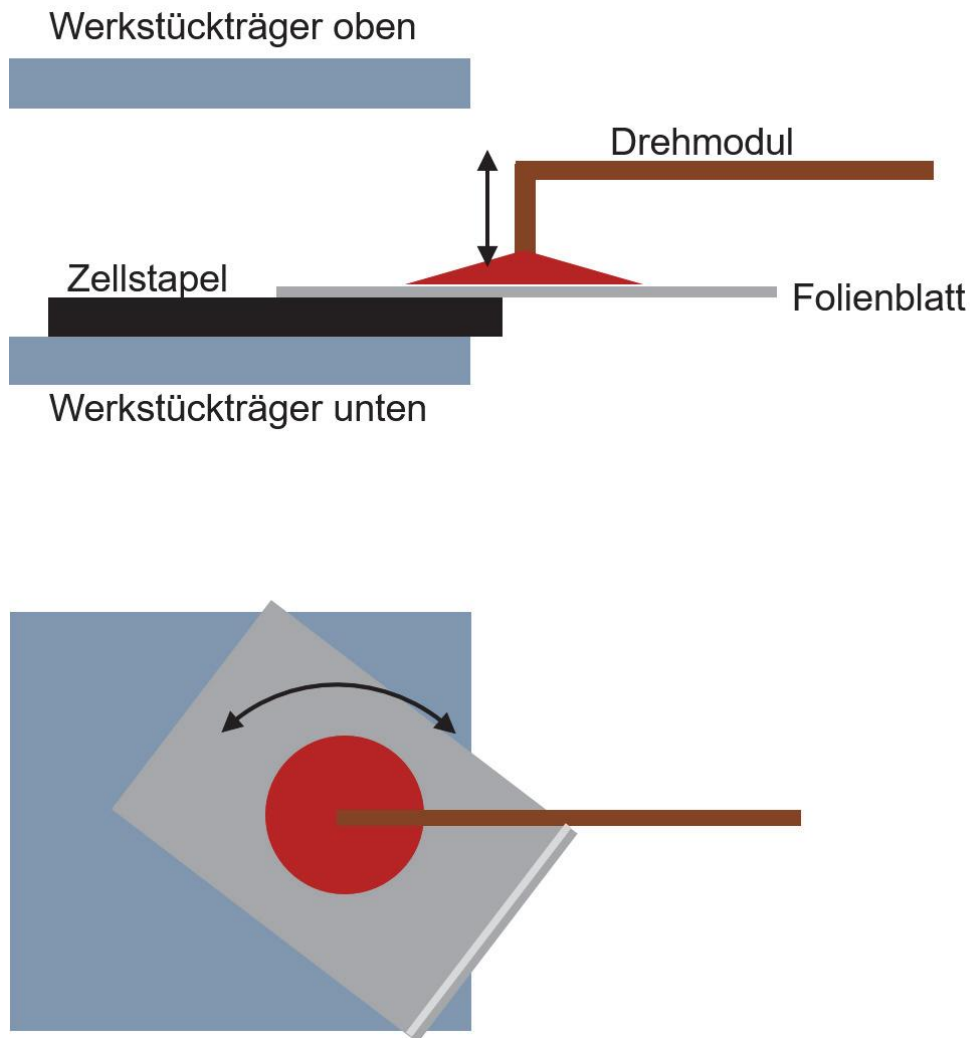


Abbildung 4.26: Positionierprozess der Verpackungsfolie auf dem Zellstapel (oben) und Drehprozess der einseitig versiegelten Zelle (unten). Der obere Teil des Werkstückträgers ist in der unteren Darstellung ausgeblendet.

schnitte, jeweils 5 mm lang, die Breite ist dabei abhängig von der Breite der Siegelbalken. Dadurch ergibt sich eine gewisse Flexibilität bei der Versuchsdurchführung, weshalb diese Technologie gewählt wurde. Es wurden insgesamt zwei Paare von Heißsiegelbalken beschafft. Ein Paar weist dabei Aussparungen auf, wo die Ableiterbleche aus der Verpackungsfolie hindurch geführt wird. Dies ist notwendig, damit die Heißsiegelbalken mit der gesamten Länge der Siegelnaht auf der Folie in Kontakt stehen – sind keine Aussparungen vorhanden, liegen die Siegelbalken lediglich auf der dicksten Stelle auf und es erfolgt keine oder keine saubere Versiegelung der Folie auf der gesamten zu versiegelnden Länge. Damit sind die Siegelbalken jedoch an den festgelegten Abstand, Dicke und Breite der Ableiterbleche angepasst und in dieser Hinsicht unflexibel. Das andere Paar der Heißsiegelbalken weist keine Profilierung auf, die

Oberfläche ist also glatt. Die profilierten Heißsiegelbalken werden zur Versiegelung der Ableiterseite verwendet, die glatten für die Versiegelung aller anderen Seiten. Die Siegelbalken haben jeweils eine effektive Länge von 320 mm bei einer Breite von 5 mm. Damit entspricht die Siegelnahtbreite dem im BaTec etablierten Siegelverfahren. Die Anordnung der Heißsiegelbalken in der Siegelanlage ist in Abbildung 4.27 dargestellt. Der oberste und unterste Balken werden dabei jeweils von zwei pneumatischen Führungszylindern bewegt und mit der nötigen Anpresskraft beaufschlagt. Durch die Verwendung von Führungszylindern kann auf eine externe Führung der Siegelbalken verzichtet werden. Der pneumatische Druck kann über einen händisch betätigten Druckminderer zwischen 0 und 6 bar stufenlos angepasst werden, sodass der Siegeldruck abhängig von der Siegelnahtfläche eingestellt werden kann.

Das Drehmodul muss zwei Positionen erreichen können, diese sind das Verpackungsfolienmagazin und den Zellstapel im Werkstückträger. Wie oben beschrieben ist dabei der Werkstückträger durch den zentralen Handlingroboter flexibel positionierbar, weshalb das Drehmodul nicht flexibel positionierbar sein muss, um dessen Position relativ zum Werkstückträger zu ändern. Es müssen lediglich die zwei Positionen „Folienmagazin“ und „Werkstückträger“ eingestellt werden können. Für die Positionierung an zwei festgelegten Positionen bietet sich ein pneumatischer Zylinder als Aktor an, in diesem

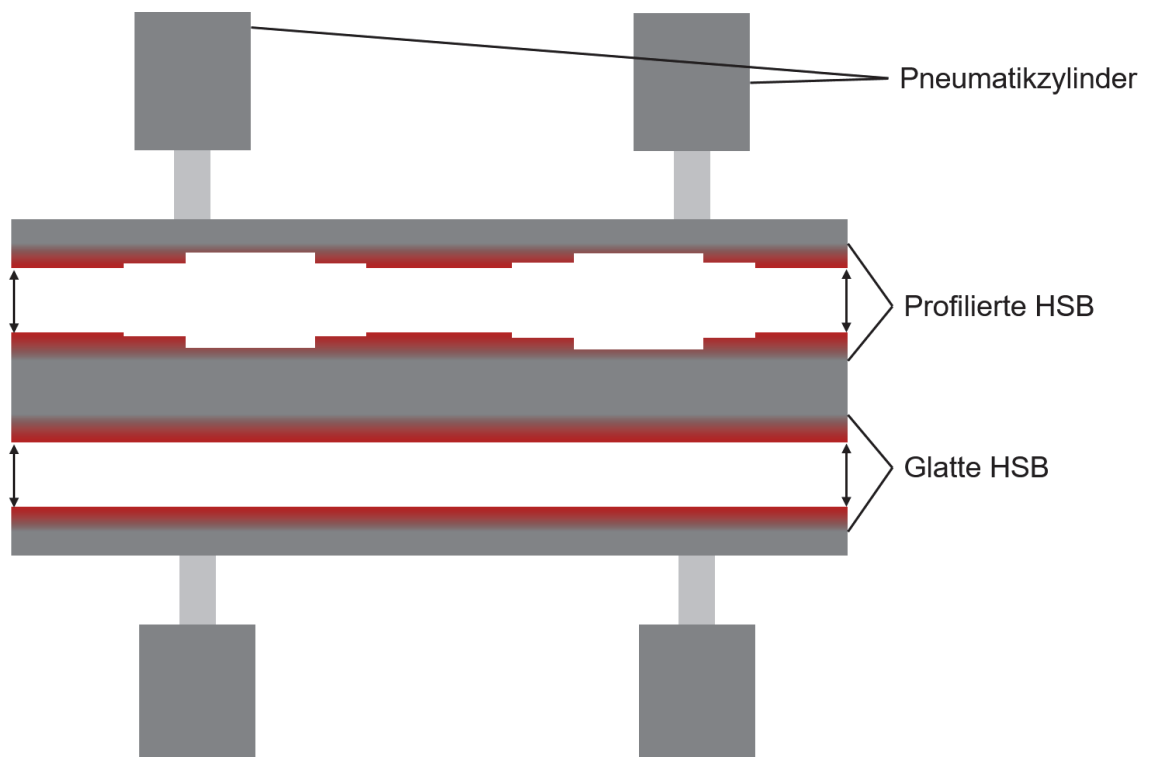


Abbildung 4.27: Anordnung der Heißsiegelbalken (HSB) des Verpackmoduls

Fall wurde sich für einen Schwenkzylinder mit einem Drehwinkel von 90° entschieden, da diese Aktorik kompakt in die Anlage integriert werden kann. Zum Aufnehmen und Ablegen der Verpackungsfolie wird ein Vertikalhub benötigt, da auch hier die Positionen nicht flexibel sind, wird ebenfalls auf einen pneumatischen Zylinder zurückgegriffen. Um eine externe Führung zu vermeiden, wird ein Führungszylinder eingesetzt. Der Zylinder wird ebenfalls verwendet, um das Drehwerkzeug (s.u.) auf die Zelle im Werkstückträger anzupressen, damit ein Kraftschluss zwischen Werkzeug und Zelle zur rotatorischen Beschleunigung dieser entsteht. Dies ist bei pneumatischen Zylindern einfach umzusetzen, da die Anpresskraft durch den pneumatischen Druck geregelt werden kann. Zu diesem Zweck findet ein händisch betätigter Druckminderer Einsatz. Die Drehung des Zellstapels muss flexibel erfolgen, weshalb elektrische Aktoren hier besser geeignet sind, als pneumatische. Zur Auswahl stehen in der geforderten Baugröße Servomotoren oder Schrittmotoren. Die Umsetzung mit einem Schrittmotor ist dabei einfacher und kostengünstiger, da kein Wechselrichter und kein Decoder zur Positionsermittlung nötig sind. Am Schrittmotor selbst ist das Ansaug- und Drehwerkzeug angebracht. Dieses besteht aus zwei Vakuumsaugern im Abstand von 7,5 cm. In Abbildung 4.28 ist der Aufbau des Drehmoduls schematisch dargestellt. Der Ablauf der Folieneinbringung sieht also wie folgt aus:

- Schwenkzylinder des Drehmoduls ist auf Position Folienmagazin, Vertikalhubzylinder in der oberen Position
- Vertikalhubzylinder wird auf untere Position gefahren, dadurch wird das Werkzeug auf die Verpackungsfolie gedrückt
- Die Vakuumejektoren des Ansaugwerkzeuges werden mit pneumatischem Druck beaufschlagt, das Vakuum wird erzeugt und das Folienblatt wird angesaugt

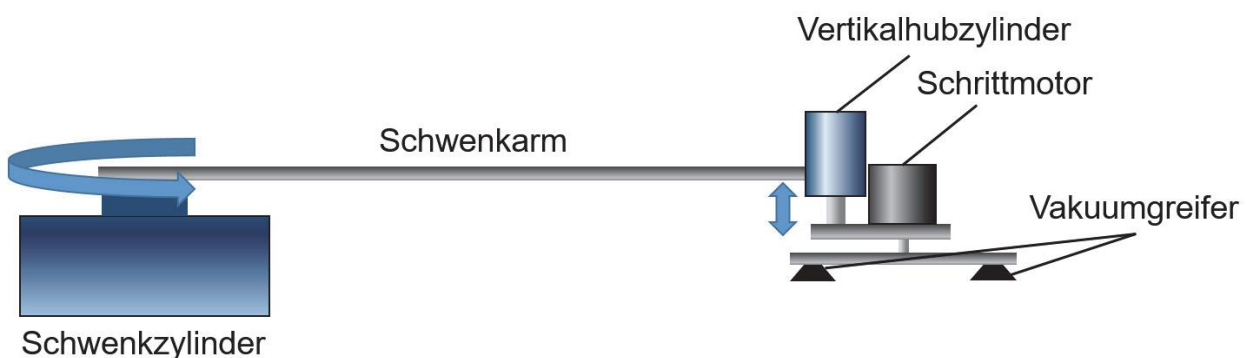


Abbildung 4.28: Schematische Darstellung des Drehmoduls

- Der Vertikalhubzylinder wird auf die obere Position gefahren, das Folienblatt wird angehoben
- Falls notwendig kann die Folie nun über den Schrittmotor gedreht werden
- Der Schwenkzylinder fährt auf die Position Werkstückträger, die Folie ist nun über dem Zellstapel
- Der Vertikalhubzylinder fährt auf die untere Position und drückt damit die Folie auf den Zellstapel
- Die Druckzufuhr auf die Vakuumejektoren wird unterbrochen, das Vakuum endet, die Folie liegt auf dem Zellstapel
- Der Vertikalhubzylinder fährt auf die obere Position, der Schwenkzylinder fährt auf die Position Folienmagazin, damit ist die Ausgangslage wieder erreicht

Zwischen dem Ablegen der Folien auf dem Zellstapel muss der Werkstückträger vom Handlingroboter um 180° in der Längsachse gedreht werden, sodass sich der Zellstapel nach dem Ablegen der zweiten Folie zwischen beiden Verpackungsfolien befindet.

Das Versiegeln läuft anschließend wie folgt ab:

- Einfahren des Werkstücks in die Siegelbalken für die Ableiterseite, Versiegelung
- Der Werkstückträger fährt an die definierte Position zum Drehen des Werkstücks und öffnet
- Der Schwenkzylinder des Drehmoduls wird auf die Position Werkstückträger verfahren, der Vertikalhubzylinder ist dabei in der oberen Position
- Der Vertikalhubzylinder fährt auf die untere Position und drückt somit auf die Zelle
- Die Vakuumejektoren werden zur besseren Kraftübertragung aktiviert
- Der Schrittmotor dreht die Zelle im Werkstückträger
- Falls nötig verfährt der Werkstückträger, um die Zelle in diesem umzupositionieren
- Das Vakuum wird ausgeschaltet, der Vertikalhubzylinder fährt auf die obere Position
- Der Schwenkzylinder fährt auf die Position Folienmagazin, der Werkstückträger schließt
- Die nun vorne aus dem Werkstückträger ragende Seite der Zelle wird zwischen die Siegelbalken gefahren und versiegelt

Diese Schritte zur Drehung, Umpositionierung und Versiegelung werden so oft wiederholt wie für die jeweilige Zellgeometrie nötig, eine oktagonförmige Zelle würde für die

Versiegelung von 7 Seiten (eine Seite bleibt stets unversiegelt für die anschließende Befüllung, siehe Kapitel 2.1.3) also 6 Drehvorgänge benötigen (pro Seite ein Drehvorgang, für die Versiegelung der ersten Seite wird in aller Regel kein Drehvorgang benötigt, sofern diese nach dem Kontaktieren bereits korrekt orientiert ist).

Zur Validierung der Anlage wurden Zellen im KIT- und im Trapezformat an drei Seiten verarbeitet. Der Drehvorgang benötigt dabei ca. drei Sekunden, der Positioniervorgang ca. vier Sekunden, die Versiegelung (abhängig von der Siegeltemperatur, s.u.) etwa 2 Sekunden. Diese Zeiten sind unabhängig von der Länge der Siegelnaht, damit ist das Produktivitätsziel von 10 Sekunden pro Siegelnaht erreicht und der Proof of Concept für die Flexibilität erbracht. Weiterhin wurden Siegelproben hinsichtlich ihrer Abziehfestigkeit nach T-Peel-Test sowie Dichtigkeit mittels He-Dichtigkeitsprüfung analysiert (siehe Kapitel 2.3.3), dabei wurden Siegeltemperatur und Siegelzeit variiert. Der Siegeldruck beträgt dabei stets 1,5 bar. Es wurden jeweils drei Wiederholungen der Siegelversuche mit den Temperaturen 130, 150, 170 und 190 °C durchgeführt, vollfaktoriell jeweils mit Siegelzeiten von 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 und 3,5 Sekunden. Die Breite der Siegelbalken beträgt 5 mm. Die Abziehtests wurden nach DIN 50154 mit einer Zuggeschwindigkeit von 1 mm/s an einer Zugprüfmaschine *zwickiLine Z5.0* der Firma *Zwick Roell* durchgeführt. Alle Proben wurden dabei einem Abziehtest unterzogen. Die Dichtigkeitsprüfung erfolgte bei der Firma *Q-test* mit der Methode A.1 der Norm EN 1779 (Helium-Lecktest). Auch hier wurden alle Proben getestet.

Es wird deutlich, dass die Abziehfestigkeit der Proben innerhalb der Anforderungen liegt, wenn die Siegeltemperatur 150 °C überschreitet und eine Siegelzeit von über 2 s eingehalten wird. Es ist ein Trend zu höheren Abziehfestigkeiten bei höheren Siegeltemperaturen bzw. längeren Siegelzeiten zu erkennen.

Für die Dichtigkeit lässt sich kein klarer Trend ableiten, werden Siegeltemperaturen von über 150°C bei Siegelzeiten von über 1 s verwendet, ergeben sich ausreichend dichte Siegelnähte. Die Ergebnisse dieser Tests sind in Abbildung 4.29 dargestellt. Eine abschließende Bewertung des Produktionsmoduls ist in Kapitel 4.5.1 gegeben. In Abbildung 4.30 ist das Verpackmodul als Fotografie dargestellt.

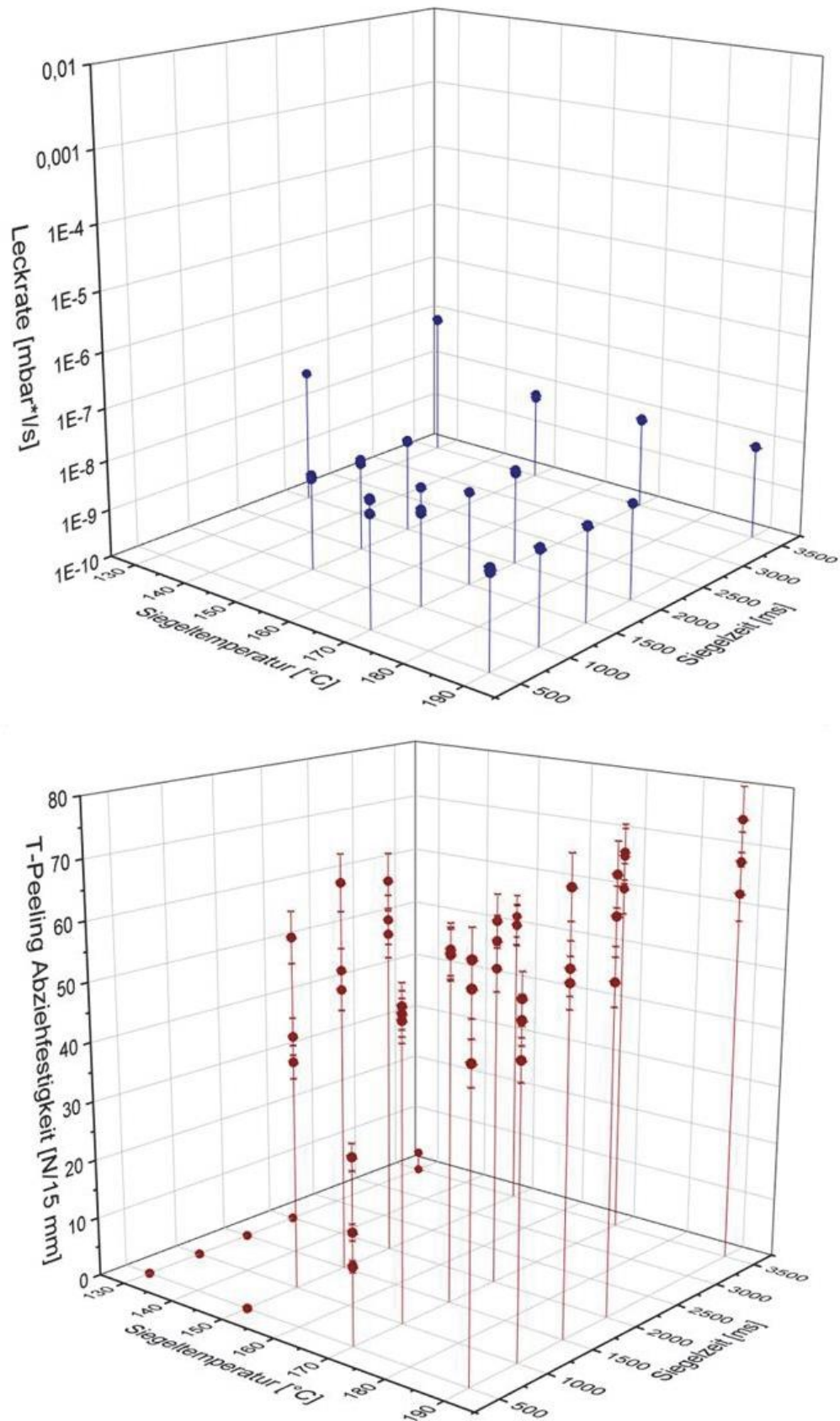


Abbildung 4.29: Ergebnisse der Dichtigkeitstests (oben) und der Abziehtests (unten) zur Validierung des Verpackmoduls

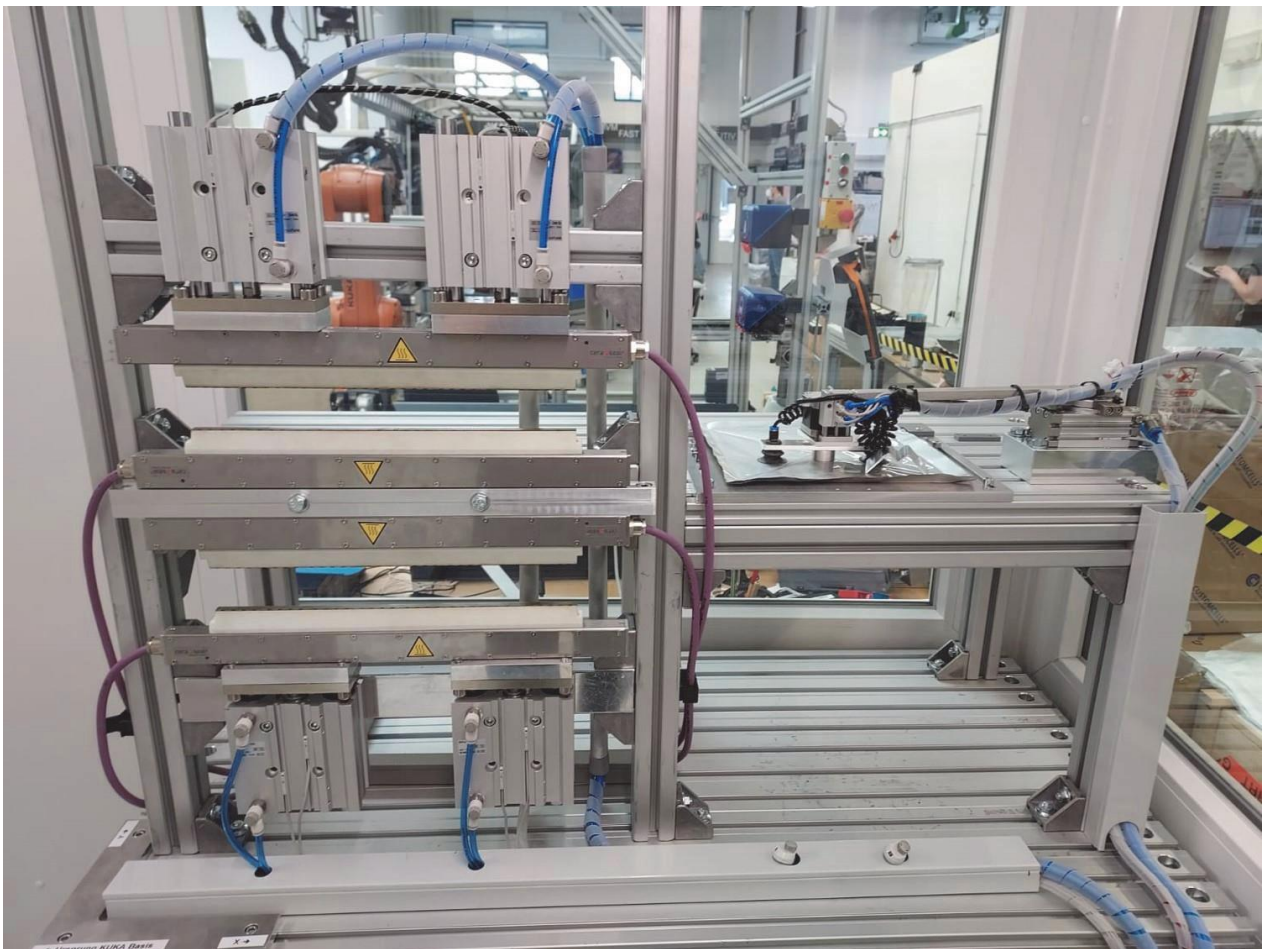


Abbildung 4.30: Verpackmodul als Fotografie. Links im Bild die Heißsiegelanlage, rechts das Drehmodul

4.4.4 Gesamtanlage

In Abbildung 4.31 ist die Gesamtanlage als Roboterzelle als Fotografie der Anlage abgebildet. Diese wird im Rahmen des zugehörigen Forschungsprojektes „SmartBatteryMaker (SBM)“ genannt.

Zum Greifen und Handling des Zellstapels wurde ein passender Greifer für den zentralen Handlingroboter (Werkstückträger) entwickelt. Dieser ist in Abbildung 4.32 dargestellt. Das Design des Greifers ist in Abstimmung mit dem Design der Stapelablage des Stapelmoduls erfolgt, sodass eine Übergabe und sicheres Greifen des Zellstapels problemlos möglich ist. Der obere Teil des Werkstückträgers kann dabei durch Betätigung eines am Greifer befindlichen Pneumatikzylinders einen Hub von 70 mm durchführen, um den Werkstückträger zu öffnen oder das Werkstück kraft geregelt zu greifen.



Abbildung 4.31: Fotografie der Roboterzelle als Innenansicht, Sicht auf Stapelmodul und Kontaktiermodul

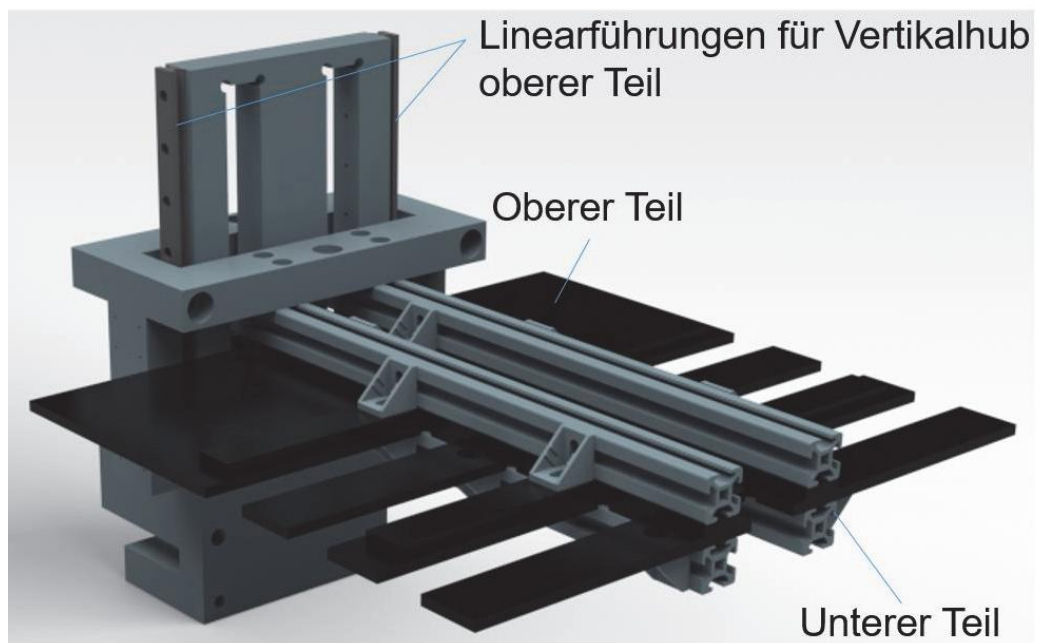


Abbildung 4.32: Greifer des zentralen Handlingroboters als Konstruktionsmodell

Der Gesamtproduktionsablauf findet wie folgt statt, dieser ist in Abbildung 4.33 anhand von Momentaufnahmen dargestellt:

- Stapel wird im Stapelmodul assembliert
- Währenddessen wird der Werkstückträger von einer Ablageposition an den zentralen Handlingroboter gekoppelt
- Werkstückträger wird geöffnet und von zentralem Handlingroboter in Stapelablage des Stapelmoduls positioniert
- Stapel wird vom Werkstückträger gegriffen und vom Stapelmodul entspannt
- Stapel wird im Werkstückträger vom zentralen Handlingroboter zum Kontaktiermodul geführt
- Ableiterblech wird vom Kontaktiermodul positioniert, Schweißvorgang
- Umpositionierung des Stapels
- Zweites Ableiterblech wird von Kontaktiermodul positioniert, Schweißvorgang
- Kontaktierter Zellstapel wird in Werkstückträger zum Drehmodul des Verpackmoduls positioniert
- Folie wird wie oben beschrieben beidseitig hinzugefügt
- Zelle wird im Werkstückträger vom zentralen Handlingroboter in den Siegelbalken positioniert, Siegelvorgang
- Drehen der Zelle durch Drehmodul wie oben beschrieben
- Wiederholung der letzten zwei Schritte abhängig vom Zellformat

Die Gesamtanlagensteuerungsarchitektur ist in Abbildung 4.34 dargestellt. Jedes Produktionsmodul verfügt über eine fehlersichere SPS des Typs Siemens S7-1516F, zusätzlich gibt es eine übergeordnete, zentrale SPS des gleichen Typs zur Gesamtanlagensteuerung. Die SPSen der Produktionsmodule kommunizieren mit der zentralen Steuerung dabei über das herstellerunabhängige Protokoll OPC UA, um eine Anbindung alternativer Module zu ermöglichen. Die zentrale SPS fungiert dabei als Client und die Modul-SPSen jeweils als Server. Dabei sendet die zentrale SPS entsprechende Bool'sche Variablen als Befehle an die Module, welche dann die entsprechenden Programme ablaufen lassen. So startet beispielsweise der Befehl „Start_Stapel = TRUE“ den Stapelvorgang, sollten alle Startbedingungen erfüllt sein. Nach dem erfolgreichen



Abbildung 4.33: Momentaufnahmen des Fertigungsprozesses in der Roboterzelle. Entnahme des Stapels (oben links), Roboter beim Kontaktieren (oben rechts) & Siegelprozess (unten)

Prozess liest die zentrale SPS dann die Variable „Stapeln_erfolgt = TRUE“ aus dem Stapelmodul aus und fährt dann mit dem weiteren Programm fort.

Weiterhin erfolgt das Lesen der Prozesszustandsvariablen auf den Modulsteuerungen, sodass der Zustand der Anlage der zentralen SPS jederzeit bekannt ist. Die Weiterleitung der Kommunikation zwischen zentralem Roboter und den Produktionsmodulen ist

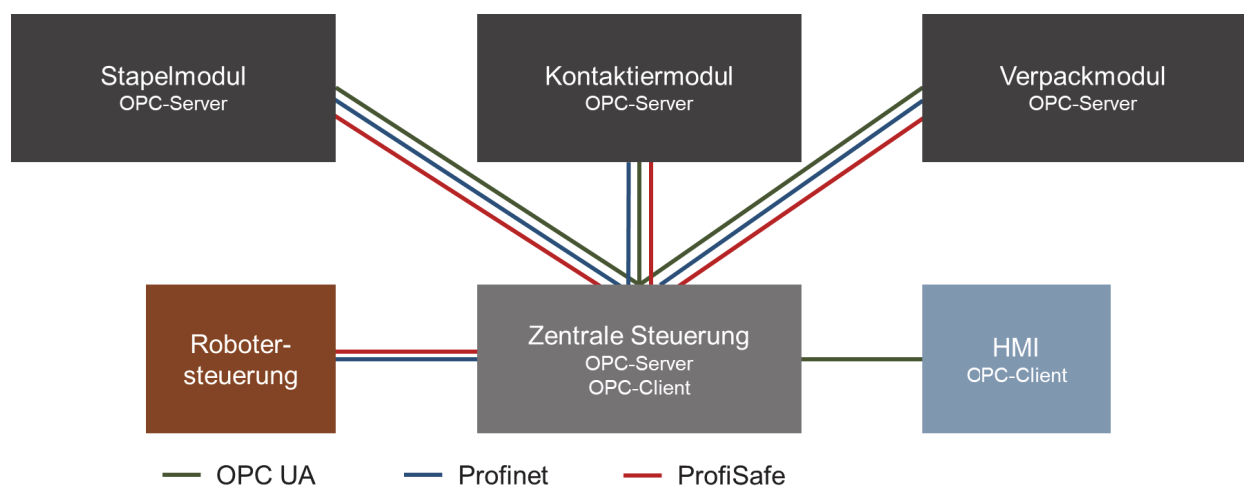


Abbildung 4.34: Steuerungsarchitektur der Gesamtanlage

ebenfalls Aufgabe der OPC UA-Kommunikation zwischen Anlagen- und Modulsteuerungen. Der zentrale Handlingroboter ist dabei über das Profinet-Protokoll mit der zentralen Steuerung verbunden.

Die Sicherheitssignale werden über das ProfiSafe-Protokoll zwischen den Steuerungen ausgetauscht, dabei ist das Not-Aus-Signal zentralisiert, sodass sobald ein Not-Aus-Schalter an der Anlage betätigt wird, alle Module und die Gesamtanlage den Not-Aus-Modus einschalten. Um den sicheren Betrieb des Roboters zu gewährleisten, kann dieser nur in den Automatikmodus gebracht werden, wenn ein fehlersicherer Magnet-sensor meldet, dass die Anlagentür geschlossen ist.


Die Bedienerschnittstelle zur Anlage ist als webbasierte Nutzeroberfläche (HMI) umgesetzt. Dabei wird auf dem zur Anlage gehörigen Leitrechner ein HTML-Server erstellt, welcher die Oberfläche hostet und die Variablen mit einem ebenfalls auf dem Leitrechner gehosteten OPC UA-Server austauscht. Dieser OPC UA-Server kommuniziert nun mit der zentralen SPS, welche in diesem Fall den OPC UA-Client darstellt. Die Web-oberfläche des Nutzerinterfaces ist in Abbildung 4.35 dargestellt.

Der Produktionsablauf startet damit, dass der zentrale Handlingroboter den oben genannten Greifer ankoppelt. Das Stapelmodul startet dann mit der Erstellung des Zellstapels und meldet die Fertigstellung. Danach fährt der Roboter den Greifer in die Stapelablage und Greift den Stapel, welcher dann von den Niederhaltern des Stapelmoduls freigegeben wird. Dabei ragen die Ableiterföhnchen über den Greifer hinaus. Im Anschluss wird der Kontaktiervorgang gestartet, indem das Ableiterblech der Anode vom Vakuumgreifer des Kontaktiermoduls gegriffen wird. Der Roboter positioniert die Zelle im Anschluss so, dass die Ableiterföhnchen der Anode auf dem Amboss des Ultraschallgeräts abgelegt werden. Das Ableiterblech wird dann auf den Ableiterföhnchen abgelegt und der Schweißvorgang wird gestartet. Dann erfolgt das identische Vorgehen zur Kontaktierung der Kathoden. Im Anschluss findet der Verpackprozess wie in Kapitel 4.4.3 beschrieben statt. Nach der erfolgreichen Versiegelung der zu versiegelnden Seiten wird der Werkstückträger vom Handlingroboter über der dafür vorgesehenen Transportbox positioniert und so geöffnet, dass die Zelle beschädigungsfrei in der Transportbox abgelegt wird.

Zwischen den Produktionsprozessen verfährt der Roboter mit Werkstückträger jeweils auf seine Ausgangsposition, wodurch die Gesamtproduktionszeit zwar ansteigt, der Ablauf wird dadurch jedoch robuster und unabhängig von der Modulanordnung.

Zentrale SPS no connection

Restart Server



Bedienparameter
Analyseparameter

Gesamtanlage aktiv ■

Hauptprogrammsteuerung	Stapelmodul	Kontaktiermodul	Versiegelmodul
Programminitialisierung ●	Stapelmodul connected ■	Kontaktiermodul connected ■	Versiegelmodul connected ■
Start ●	Stapelprogramm bereit ■	Kontaktieren bereit ■	Folie einlegen bereit ■
Beenden ●	Stapelentnahme bereit ■	Tapen bereit ■	Siegeln der Ableiterseite bereit ■
STOP ●	Stapelprogramm aktiv ■	Kontaktieren aktiv ■	Drehvorgang bereit ■
Fertigungssteuerung	Stapelentnahme aktiv ■	Tapen aktiv ■	Siegeln der glatten Seite bereit ■
Fertigung starten ●			Folie einlegen aktiv ■
Zellformat: Trapezzelle ●			Siegeln der Ableiterseite aktiv ■
Kontinuierliche Fertigung ●			Drehvorgang aktiv ■
Tapen ●			Siegeln der glatten Seite aktiv ■
Magazinwechselsteuerung			
Magazine einlegen ●			
Magazine entnehmen ●			
Anodenmagazin ●			
Kathodenmagazin ●			
Separatormagazin ●			

Abbildung 4.35: Webbasiertes Nutzerinterface der Gesamtanlage

Der automatisierte Gesamttablauf und die Steuerung durch das Nutzerinterface konnten im Rahmen dieser Arbeit sowohl für die KIT-Zelle als auch für die daraus abgewandelte Trapezzelle validiert werden. Für eine an drei Seiten vorversiegelte Zelle mit jeweils drei Anoden und Kathoden und entsprechend 8 Separatorblättern werden insgesamt 2 Minuten und 20 Sekunden benötigt. Ebenfalls wurden der Austausch der Einzelblattmagazine aus dem Stapelmodul sowie das Ablegen der vorversiegelten Zelle in der Transportbox durch den zentralen Handlingroboter validiert.

4.5 Bewertung der neuartigen Anlagentechnik

In diesem Kapitel werden die Produktionsmodule sowie die Gesamtanlage als Roboterzelle soweit möglich hinsichtlich ihrer Produktivität, Qualität und Flexibilität bewertet. Dabei wird auch auf mögliche Verbesserungen eingegangen. Zunächst werden in Kapitel 4.5.1 die Produktionsmodule einzeln betrachtet, worauf in Kapitel 4.5.2 die Betrachtung der Roboterzelle folgt.

4.5.1 Bewertung der Produktionsmodule

Stapeln

Das Stapelmodul wurde in seiner Funktion und Anforderungen mit allen Formaten validiert. Die Stapelgenauigkeit mit 0,19 mm ist dabei ebenfalls innerhalb der Anforderungen. Da die SCARAs eine Wiederholgenauigkeit von 0,01 mm aufweisen, folgt dass die Komponenten des Stapelmoduls die Ungenauigkeit erhöhen. Diese setzt sich zusammen aus elastischen Verformungen des Greifapparats, Ungenauigkeiten der Ausgangsposition der Einzelblätter (inklusive Maßtoleranzen der Elektrodenblätter) in den Magazinen sowie Messtoleranzen aufgrund des Messprozesses. Dabei sind die elastischen Verformungen der Greiferhalterung die einzige Fehlerquelle, welche konstruktiv geändert werden kann. Mit einer Versteifung der Bauteile ist daher eine höhere Stapelgenauigkeit zu erwarten, sollte dies gefordert werden.

Es wurden abschließende Ansaugversuche mit allen diskutierten Formaten durchgeführt, welche im Folgenden beschrieben werden:

Die Zeit, die benötigt wird, um die rechteckigen und trapezförmigen Einzelblätter vollständig zu greifen, wird gemessen und verglichen, um die Leistung und Flexibilität des Catenary-Greifers zu bewerten. Der Greifer wird auf dazu einem Einzelblatt positioniert und die pneumatischen Ejektoren des Greifers mit einem Druck von 3 bar beaufschlagt, um einen Niederdruck-Luftstrom zu erreichen. Diese Versuchsanordnung ist für alle getesteten Einzelblätter gleich. Um die genaue Zeit bis zum Erreichen der vollständigen Anhaftung an die Greifer zu messen, wurde das Geräusch der pneumatischen Ejektoren aufgezeichnet. Abbildung 4.36 zeigt eine Referenzgeräuschaufnahme des Kathodengreifers bei Ansaugung ohne Einzelblatt und die Aufnahme eines Greifvorgangs eines Kathodeneinzelblattes.

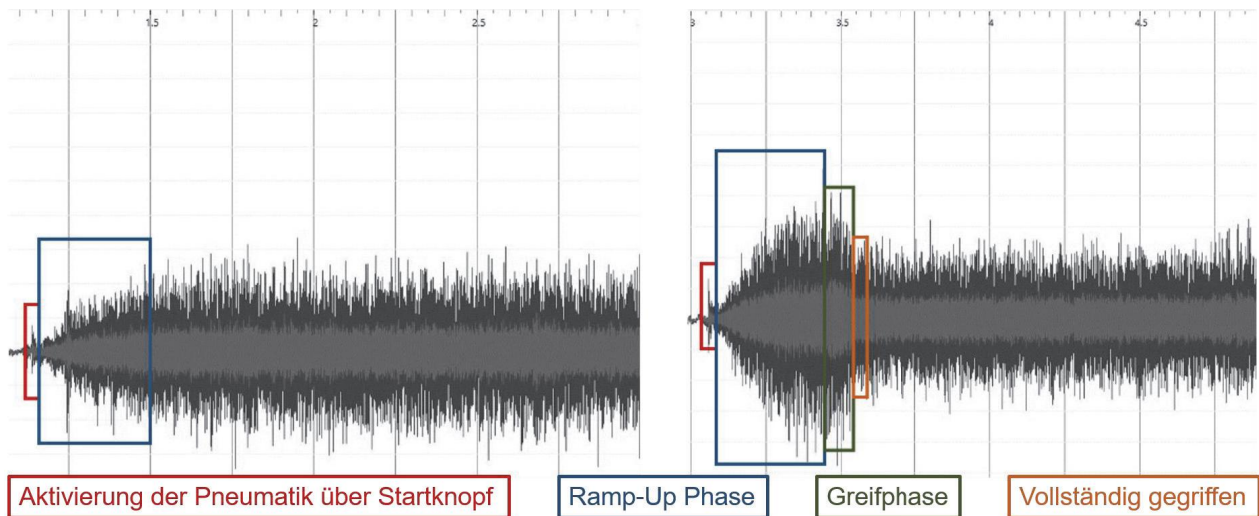


Abbildung 4.36: Visuelle Analyse von Audioaufnahmen von Greifversuchen. Links: Referenz-Audioaufnahme von Ansaugung ohne Einzelblatt. Rechts: Exemplarische Audioaufnahme des Greifvorgangs eines rechteckigen Kathodeneinzelblatts

Die Aktivierung des pneumatischen Drucks ist deutlich als scharfe Spitze zu erkennen, die dem Geräusch des Startknopfes des Experiments entspricht. Ein deutlicher Volumenabfall ist sichtbar, wenn das einzelne Blatt vollständig angebracht wird. Die Zeitdifferenz zwischen diesen Anfangspunkten entspricht der gesamten Greifzeit. Das Signal der Spitze in der Lautstärke bei Start des Experiments kann in allen Experimenten mit einer Genauigkeit von max. 0,008 Sekunden aufgelöst werden. Das Einsetzen des stationären Zustands mit geringerem Volumenstrom, also dann, wenn die Elektrode vollständig gegriffen ist, kann wiederholt mit einer Genauigkeit von 0,03 Sekunden bestimmt werden, was eine Gesamtgenauigkeit von $\pm 0,038$ Sekunden ergibt. Für Separatorblätter ist aufgrund der Porosität des Separators keine Audioanalyse möglich, da keine beobachtbare Volumenänderung stattfindet, wenn das Blatt am Greifer anliegt. Die Zeitpunkte für die Versuche mit Separatoren werden manuell mit einer Genauigkeit von 0,2 Sekunden für den Beginn des Versuchs und 0,2 Sekunden für das Versuchsende, also das vollständige Greifen des Blattes, angenommen werden, was eine Gesamtgenauigkeit von $\pm 0,4$ Sekunden ergibt. Alle Versuche wurden fünfmal wiederholt.

Die Audioaufnahmen wurden mit einem Google Pixel 6-Telefon aufgenommen. Die gesamte Audioanalyse erfolgt in der Open-Source-Software Sonic Visualiser durch manuelle Definition der Anfangszeiten nach Änderungen im Signal (siehe Abbildung 4.36). Die verwendeten Elektroden sind doppelseitig beschichtete NMC111-Kathoden mit einer Flächenkapazität von $1,75 \text{ mAh/cm}^2$ und doppelseitig beschichtete Graphitanoden

mit einer ähnlichen Kapazität. Bei den in den Experimenten verwendeten Separatoren handelt es sich um keramikbeschichtete Polyolefin-Separatoren mit einer Dicke von 14 μm . Die verwendeten Greifer sind für alle Versuche baugleich.

Die Ergebnisse der Greifversuche sind anhand der Greifzeit in Abbildung 4.37 dargestellt. Das Greifen von trapezförmigen Einzelblättern funktioniert ebenso zuverlässig wie bei rechteckigen Blättern, bei Anoden ist die Gesamtgreifzeit bei dem Trapezformat etwas geringer, was ebenfalls bei Separatoren der Fall zu sein scheint. Dies ist höchstwahrscheinlich auf das geringere Gewicht von Elektroden im Trapezformat im Vergleich zu rechteckigen Einzelblättern zurückzuführen, während bei Kathoden andere Effekte wie die Materialsteifigkeit und damit der Widerstand gegen das Biegen zum Anliegen an der gebogenen Greiferoberfläche dominieren. Der neuartige Catenary-Greifer hat sich als zuverlässig und flexibel bei der Befestigung von rechteckigen und trapezförmigen Elektroden und Separator-Einzelblättern erwiesen.

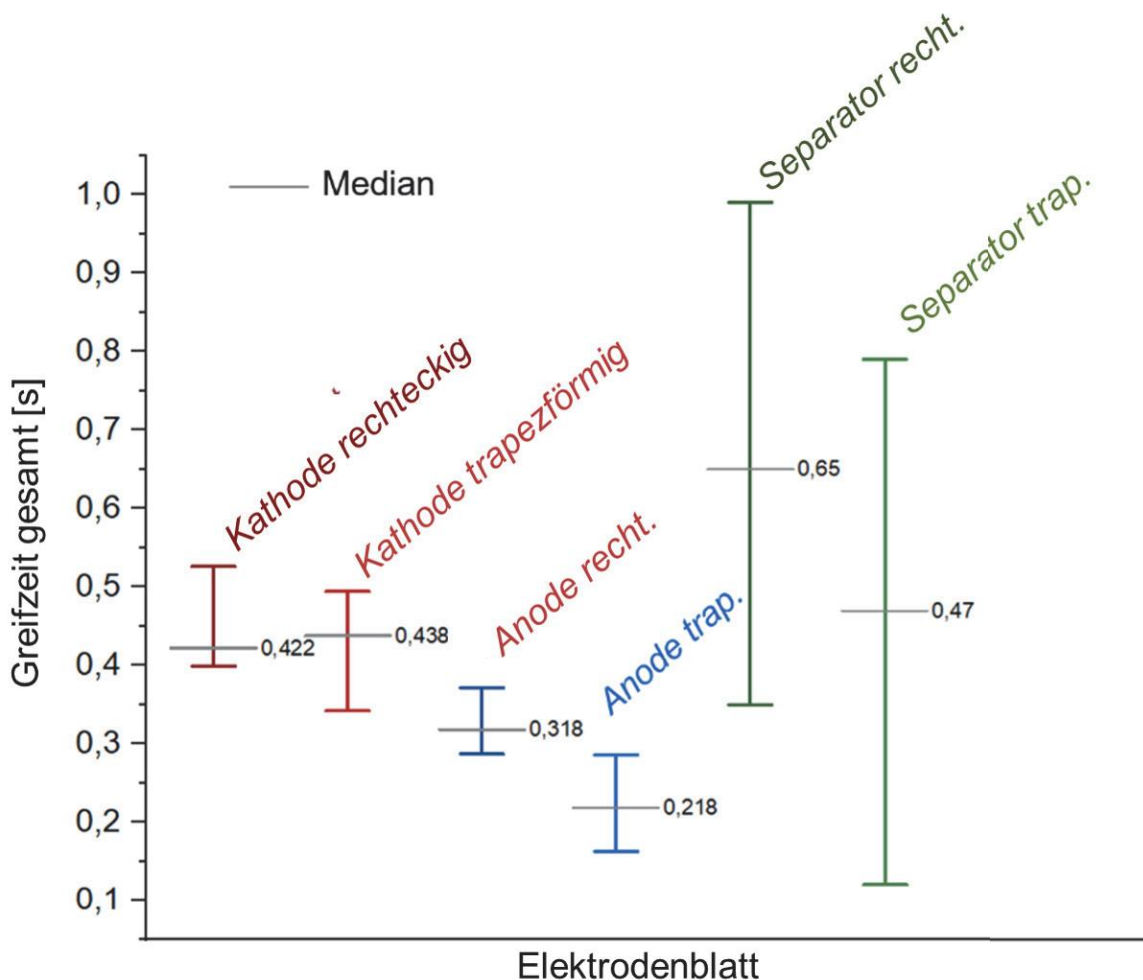


Abbildung 4.37: Ansaugzeiten in den finalen Greifversuchen für die verschiedenen Einzelblätter

Die Verwendung der gebogenen Catenary-Greifer weist weiterhin einen erwünschten Nebeneffekt auf. Durch die nicht-parallele, schräge Ansaugung wird das obere Blatt vom Magazin eher „abgeschält“ als gleichmäßig angehoben. Bei den porösen Separatoren wird dadurch das Ansaugen mehrerer Blätter verringert. Durch eine geeignete Steuerung der zwei Saugkammern im Separatorgreifer konnte der Abschälereffekt verstärkt werden. Durch das Ansaugen in der mittleren Kammer mit anschließendem Abschalten dieser Ansaugung und zeitnaher Ansaugung der äußeren Kammer konnte der Ansaugprozess so stabil eingestellt werden, dass keine Stapelfehler durch Doppelblattansaugung verursacht wurden.

Die Produktivität mit 3,8 Sekunden pro Blattablage ist ebenfalls innerhalb der Anforderungen. Dabei entfällt ca. 1 Sekunde auf das Ansaugen des Blattes. Diese Ansaugzeit wurde bisher lediglich für Blätter im KIT-Format sowie dem hier verwendeten Trapezformat bestimmt, durch die Verwendung kleinerer Einzelblätter kann möglicherweise Ansaugzeit gespart werden. Weiterhin kann das Programm hinsichtlich Produktionszeit weiter optimiert werden, so könnte z.B. die Toleranz, mit welcher ein Punkt durch die SCARA-Roboter erreicht werden muss, welcher jedoch nicht relevant für den Prozess ist, erhöht werden und dadurch die Bewegungspfade verkürzt werden.

Die Flexibilität der Stapelanlage hat sich als sehr hoch erwiesen. Alle geforderten Formate können sicher angesaugt und abgelegt werden. Soll die Flexibilität erhöht werden, so müssen die Greifer und die Niederhalter gegebenenfalls angepasst werden. Dies ist mit einem mittleren Aufwand verbunden.

Kontaktieren

In Abziehversuchen wurde die adäquate Qualität der Zellkontaktierung nachgewiesen (A_Krey 2020). In Abbildung 4.38 sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Die zu den verschiedenen Proben gehörenden Schweißparameter sind in Tabelle A.1 gelistet, es wurden jeweils drei Ableiterföhnchen mit dem Ableiterblech verschweißt.

Die Produktivität des Kontaktiermoduls ist sehr gut. Durch die Verwendung schneller Achsen und industrieller Ultraschallschweißanlagen lassen sich kurze Prozesszeiten realisieren. Das Kontaktieren beider Ableiterbleche mit den jeweiligen Elektroden dauert insgesamt lediglich 15 Sekunden.

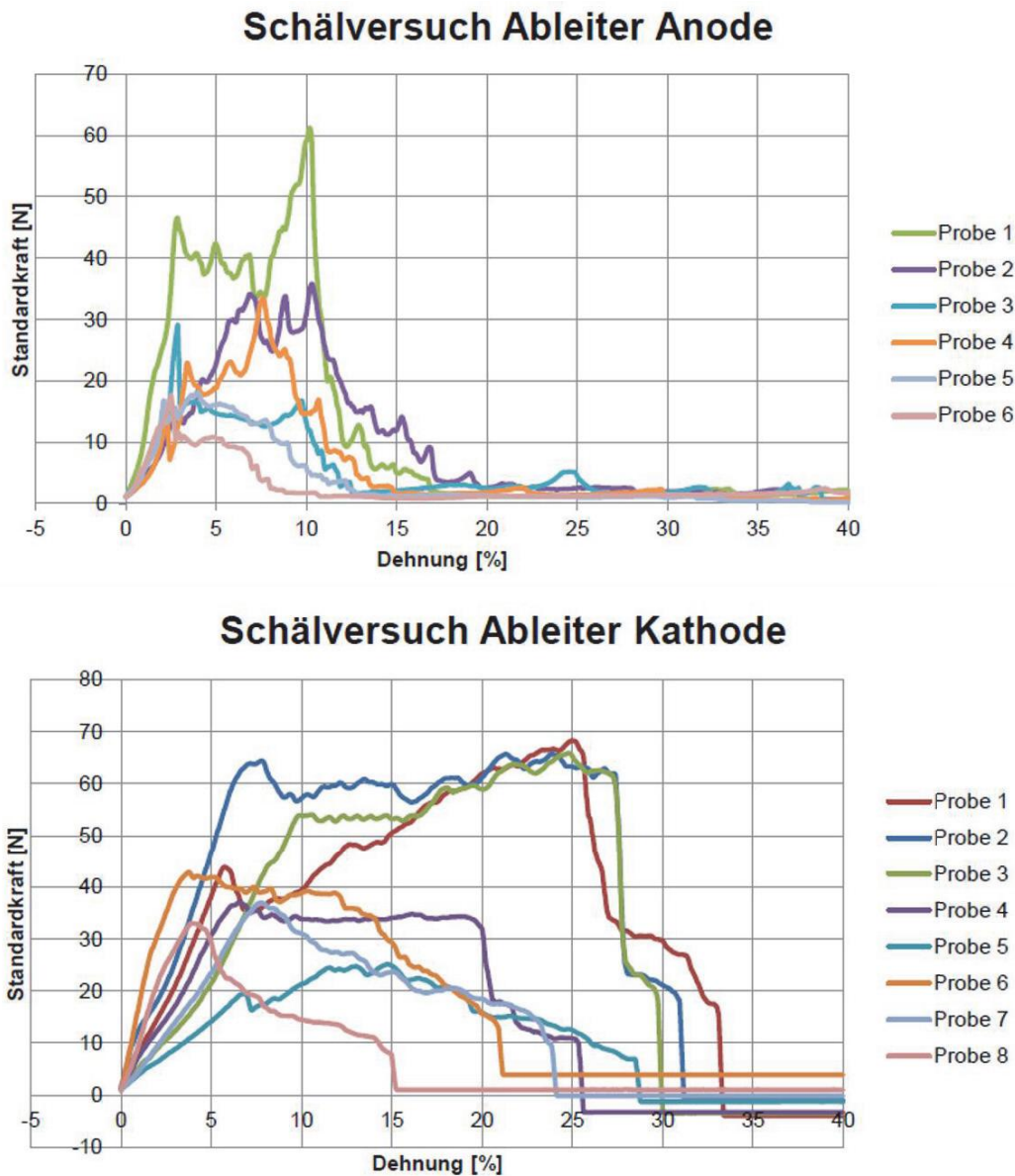


Abbildung 4.38: Ergebnisse der Ableiter-Abschältests für Anoden (oben) und Kathoden (unten) aus (A_Krey, 2020)

Durch das Verwenden einer Sonotrode mit nur einem Werkzeug ist die Schweißnahtgestaltung nicht flexibel umgesetzt. Dies ist jedoch nur in Spezialfällen erforderlich. Zur Erhöhung der Flexibilität wurden weiterhin austauschbare Ableiterblechmagazine ergänzt. So kann die Bauart der Ableiter variiert werden. Eine Anpassung des Schweißwerkzeuges ist jedoch nur für sehr viel größere oder sehr viel kleinere als die hier verwendeten Ableiterbleche notwendig.

Verpacken

Die Qualität des Siegelprozesses konnte in Dichtigkeits- und Abziehversuchen validiert werden. Die Abziehversuche zeigen klar, dass ein Tear-Seal entsteht, die Leckrate ist deutlich unterhalb des Maximalwerts. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5.3 detailliert erläutert. Die Positioniertoleranz des zentralen Handlingroboters und die Winkeltoleranz des Schrittmotors haben in den Siegelversuchen keine qualitätsrelevanten Auswirkungen auf die Verpackung oder deren Dichtigkeit gezeigt.

Die Produktivität der Anlage ist mit etwa 9 Sekunden pro zu versiegelnder Seite (inklusive Positionier- und Drehvorgänge) gut, kann aber durch eine Optimierung der Bahnplanung sowie der Verfahrgeschwindigkeiten des Handlingroboters erhöht werden. Die Prozesszeiten für das Heißsiegeln sind dabei mit unter drei Sekunden sehr gering und bedürfen keiner weiteren Optimierung.

Die Flexibilität des Verpackmoduls ist eingeschränkt. Da hier ein werkzeuggebundener Prozess Anwendung findet, ist eine uneingeschränkte Flexibilität nicht zu erreichen. Durch Umorientieren der Zelle relativ zu den Siegelbalken lassen sich sämtliche konvexen Formate mit geraden Kanten versiegeln. Konvexe Ecken sind theoretisch abbildbar, aufgrund der konstruktiven Umsetzung des Moduls jedoch zu vermeiden, da hier eine saubere Versiegelung und eine kollisionsfreie Bewegung der Zelle nicht sichergestellt werden kann. Radien sind nur näherungsweise durch eine Vielzahl an geraden Siegelnähten abbildbar, dabei steigt jedoch die Produktionszeit mit jeder Siegelnaht linear an, da die Zelle für jede Naht umorientiert werden muss. Daher sind Rundungen in den zu verarbeitenden Zellformaten ebenfalls zu vermeiden.

Weitere Schwachstellen in der Umsetzung des Verpackmoduls lassen sich im Handling der Verpackungsfolieneinzelblätter feststellen. Dadurch, dass die Vakuumbreifer des Drehmoduls das Drehen der Zelle im Werkstückträger durchführt und auch kleine Zellformate bearbeitet werden können sollen, wurde der Abstand der Vakuumbreifer möglichst gering gewählt. Dadurch ergeben sich beim Handling der Folienblätter Probleme, diese hängt aufgrund der geringen Biegesteifigkeit der Verbundfolie mehrere Millimeter durch, was zu Kollisionen mit dem Werkstückträger führen kann. Um dies zu vermeiden, können die Folienblätter beispielsweise durch Falten versteift werden. Dabei muss jedoch stets auf eine beschädigungs- und schmutzfreie Bearbeitung geachtet werden.

In Tabelle 4.12 ist die Bewertung der Module hinsichtlich Qualität, Produktivität und Flexibilität als Übersicht gegeben.

Insgesamt erfüllen alle Anlagen die gestellten Anforderung an Prozess und Handling. Für die finale Industrialisierung sind vor allem Prozessüberwachungsmaßnahmen zu treffen sowie Maßnahmen zur Erhöhung der Produktivität.

Tabelle 4.12: Übersicht über die Bewertung der Produktionsmodule

	Stapelmodul	Kontaktiermodul	Verpackmodul
Qualität	+	++	++
Produktivität	o	++	+
Flexibilität	++	o	-

4.5.2 Gesamtanlage

Die Funktion der Gesamtanlage wurde mittels Testproduktionen von KIT- und Trapezzellen mit einer verringerten Anzahl an Elektroden erfolgreich überprüft. Das Zusammenspiel der verschiedenen Steuerungen verlief reibungslos, alle Sicherheitstests waren ebenso erfolgreich. Über die Benutzerschnittstelle lässt sich die Gesamtanlage zuverlässig steuern.

Durch die erfolgreiche Verwendung eines Sechs-Achs-Industrieroboters als zentrales Handlinglelement wurde gezeigt, dass Batterieassemblierung mit flexiblen Kinematiken in industrieller Qualität möglich ist. Dies bildet die Grundlage für die weitere Entwicklung des in Kapitel 2.2 vorgestellten agilen Produktionssystems für die flexible Batteriezellproduktion. Die Produktivität dieser Lösung ist dabei deutlich geringer als bei einer starr verketteten Linienproduktion, durch eine Optimierung der Bahnplanung und der Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters lassen sich jedoch beim Handling deutliche Zeiteinsparungen erreichen.

Die erfolgreiche Verwendung einer abgeschlossenen Roboterzelle zeigt zudem deutlich, dass eine vollautomatisierte Assemblierung von Batteriezellen im Microenvironment möglich und aufgrund der potentiellen Energieeinsparung gegenüber einem großen Trockenraum mit darin befindlichem Personal äußerst sinnvoll ist.

5 Alternativer Siegelprozess

5.1 Motivation

Im in Kapitel 4.3.3 diskutierten Ansatz werden gerade Siegelbalken für die Siegelnähte gewählt und die Zelle entsprechend flexibel positioniert, sodass jede gerade Kante in einem Prozessschritt versiegelt werden kann. Dadurch lässt sich jedes konvexe Format mit geraden Kanten, also auch das hier verwendete Trapezformat, durch ein entsprechendes Handling der Zelle verpackt werden. Runde, konvexe Kanten sind dabei durch die gerade Form des Siegelbalkens nur unter Annäherung und mit entsprechend vielen Siegelnähten abbildbar. Konkave Ecken oder Rundungen sind ebenfalls nur stark eingeschränkt möglich, dies ist abhängig vom Zell- und Anlagendesign. Die Flexibilität hinsichtlich zukünftiger Formate wird daher negativ bewertet. Da sich die Siegelbalken nach Aktivierung bis zum Ende des Prozesses nicht relativ zur Pouch-Folie bewegen, wird dieser Prozess hier der statische Siegelprozess genannt.

Aufgrund der mangelnden Flexibilität des statischen Siegelprozesses wird in diesem Kapitel eine Alternative gesucht und sowohl der Prozess als auch die Anlage entwickelt. Dabei befasst sich der in diesem Kapitel diskutierte Ansatz mit dem dynamischen Siegelprozess. Es bewegt sich bei diesem das Siegelwerkzeug relativ zur Pouch-Folie. Durch eine entsprechende Kinematik kann so jeglichem Siegelpfad auf der Folie gefolgt werden, der Prozess ist also voll formatflexibel. Die Prozess- und Anlagenentwicklung wird hier systematisch durchgeführt und diskutiert, eine Validierung findet im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht statt, da die Anlage zum Zeitpunkt der Arbeit aufgrund von Verzögerungen in der Lieferung der Komponenten im Rahmen der Corona-Pandemie nicht vollständig aufgebaut werden kann.

Das Konzept der dynamischen Versiegelung ist auch auf die in (Pfeiffer 2019) entwickelten Faltverpackungen für Pouch-Zellen übertragbar, was für die statische Versiegelung nicht der Fall ist.

5.2 Prozessauswahl

Die in Kapitel 2.3.2 beschriebenen alternativen, flexiblen Siegelverfahren werden in dem vorliegenden Kapitel bewertet und ein Prozess für die weitere Entwicklung des flexiblen Siegelmoduls ausgewählt. Zur Bewertung dienen die Kriterien Flexibilität,

Qualität und Umsetzbarkeit. Zur Produktivität lässt sich anhand theoretischer Überlegungen ohne Vorversuche keine qualifizierte Aussage treffen, weshalb dieses Kriterium nicht betrachtet wird.

Die Ergebnisse der Bewertung sind in Tabelle 5.1 gelistet.

Die Globo-Weld Technologie der Firma Leister ist voll flexibel einsetzbar, es lassen sich sämtliche Konturen abbilden. Daher wird die Flexibilität mit sehr gut bewertet. Die Qualität der Schweiß- bzw. Siegelnähte wird ebenfalls als sehr gut bewertet, da Laserquellen eine sehr konstante Strahlqualität liefern und bei guter Einstellung der Parameter lassen sich reproduzierbar sehr gute Ergebnisse erzielen. Die Umsetzbarkeit wird jedoch als mangelhaft angesehen, da die Technologie eingesetzt wird, um transparente Kunststoffschichten auf Substrate dunkler Kunststoffe aufzuschweißen. Dies ist nicht der Fall bei der Versiegelung von Pouch-Zellen, der Oberflächenwerkstoff der Pouch-Folie ist in der Regel Polyamid, welches auf einer Aluminiumschicht aufgetragen ist. Dabei ist davon auszugehen, dass die Aluminiumschicht einen nicht vernachlässigbaren Teil der Laserstrahlung reflektiert und sich die Polyamidschicht stark aufheizt und schmilzt. Weiterhin werden alle sicherheitstechnischen Anforderungen, die bereits in Kapitel 4.3.2 erwähnt werden, ebenfalls relevant für die Laseranwendung. Daher ist die Umsetzbarkeit zwar theoretisch möglich, jedoch sehr aufwendig und wird als ausreichend bewertet.

Die Flexibilität eines konvektiven Siegelprozesses wird als sehr gut angesehen, da es lediglich erforderlich ist, die Heißluftdüse entlang der gewünschten Kontur zu bewegen, was mit einer geeigneten Kinematik keine größere Herausforderung darstellt. Die Qualität einer solchen Siegelnaht wird jedoch als mangelhaft bewertet, da die turbulente Luftströmung nicht genau eingestellt werden kann, wodurch Variationen in der Siegelnahtbreite sehr wahrscheinlich sind.

Tabelle 5.1: Bewertung der dynamischen Siegelverfahren

	GloboWeld	konvektives Siegeln	Ultraschall-rollnaht	Heißsiegelrollnaht
Flexibilität	++	++	++	++
Qualität	++	--	+	++
Umsetzbarkeit	--	-	+	++
Gesamt	+	o	+	++

Die Umsetzbarkeit einer flexiblen Versiegelung mittels Luftstrom wird als ausreichend angesehen, da in jedem Falle eine separate Niederhaltung der Folien erfolgen muss, um den nötigen Siegeldruck einzustellen. Diese Niederhaltung beeinflusst wiederum die Luftströmung, weshalb auch hier mit einem sehr hohen Aufwand zur Stabilisierung des Prozesses gerechnet werden muss.

Als weitere Alternative existiert das Rollnahtschweißen mittels Ultraschallschweißtechnik. Die Flexibilität wird hierbei als sehr gut bewertet, da sich mit einer geeigneten Kinematik sämtliche Konturen abbilden lassen. Die zu erwartende Qualität wird als gut bewertet, da der Prozess des Kunststoffschweißens mittels Ultraschall etabliert ist. Da dabei jedoch Perforierungen der Aluminiumschicht in der Pouch-Folie entstehen können, ist die Qualität nicht als gleichwertig mit einem auf Wärme basierenden Prozess anzusehen. Die Umsetzbarkeit wird ebenfalls als gut angesehen. Die Anlagentechnik, Regelung und nötige Kinematiken sind kommerziell verfügbar und bedürfen nur wenig Anpassung. Der Aufbau von Prozessverständnis für eine schnelle Parameterermittlung ist jedoch mit einem sehr hohen Aufwand verbunden.

Das Heißsiegeln mittels Rollnaht wird in Hinsicht auf die Flexibilität mit sehr gut bewertet, diese ist vergleichbar mit der Flexibilität von Ultraschallrollnahtschweißprozessen. Die zu erwartende Qualität einer solchen Heißsiegelrollnaht wird ebenfalls mit sehr gut bewertet, da der Heißsiegelprozess wie oben erwähnt etabliert ist und sehr gute Ergebnisse liefert. Die Umsetzbarkeit wird mit sehr gut bewertet. Alle nötigen Komponenten sind kommerziell verfügbar, eine nötige Anpassung wird gegebenenfalls nur minimal nötig. Weiterhin kann Prozessverständnis durch Versuche und Modelle vergleichsweise einfach erfolgen, da sich konduktive Wärmeströme leicht analytisch und numerisch berechnen lassen und wenig äußere Störeinflüsse wirken.

Aus der Bewertung geht hervor, dass sich ein Heißsiegelrollnahtprozess am besten eignet, um flexibel Pouch-Zellen mit hoher Qualität zu versiegeln.

5.3 Prozessentwicklung

Zunächst werden Heißsiegelversuche unter Variation der Heißsiegeltemperatur und der Siegelzeit an der in dieser Arbeit entwickelten Heißsiegelbalkenanlage durchgeführt. Im Anschluss werden Abziehfestigkeit und Dichtigkeit der Proben gemessen. Für die Abziehtests werden die Proben auf 15 ± 1 mm Breite geschnitten, um nach dem in Kapitel 2.3.3 erwähnten T-Peel-Test vorzugehen und die Abziehfestigkeit ohne weitere

Umrechnung in der Einheit N/15 mm vorliegen zu haben. Die Dichtigkeitsversuche werden bei einem externen Dienstleister mit einem Helium-Lecktest durchgeführt, sodass die Leckrate bestimmt werden kann. Mit diesen Daten können die Siegelnähte und Prozessparameter als gut oder schlecht eingeteilt werden. Es wird ein FEM-Wärmestrommodell für den Siegelvorgang mit Siegelbalken entwickelt und anhand von Versuchen validiert. Dazu wird die Simulationssoftware Comsol Multiphysics (Version 5.6) eingesetzt. Anhand der Simulation lässt sich der Temperaturverlauf an der Grenzfläche der Siegelschichten bestimmen. Da diese Temperatur (neben ausreichend Siegeldruck) die einzige ergebnisrelevante Größe beim Heißsiegelvorgang ist, kann also eine Zuordnung der Temperatur in der Siegelfläche zu den guten und schlechten Siegelnähten erfolgen. Damit ist bekannt, welche Temperatur mindestens erreicht werden muss, um eine gute Siegelnaht zu erhalten und ggf. wann die Temperatur in der Siegelfläche so hoch ist, dass negative Effekte wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben auftreten. Es wird also ein Prozessfenster für eine innere Größe aufgespannt. Um die Übertragbarkeit auf andere Pouch-Folien mit anderen Werkstoffen zu ermöglichen, wird die Temperatur auf die Schmelztemperatur des Siegelwerkstoffes bezogen und ergibt somit die dimensionslose Größe $P_T = \frac{T_I}{T_m}$.

Mit dem Wissen, welche Temperatur in der Siegelfläche erreicht werden muss, um eine qualitativ hochwertige Siegelnaht zu erhalten, wird nun ein dynamisches Heißsiegelmodell entwickelt. Dazu wird ebenfalls ein FEM-Wärmestrommodell in Comsol Multiphysics entwickelt, hierbei wird die Wärmequelle jedoch auf dem Werkstück bewegt. Dies bildet zwei abrollende Zylinder auf dem Werkstück ab, welche über ihren Wärmeeintrag eine Heißsiegelrollnaht auf dem Werkstück hinterlassen. Die Breite der Auflagefläche der Zylinder auf der elastisch verformten Folie wird dabei experimentell ermittelt. Anhand des Modells werden nun die Geschwindigkeit und Temperatur ermittelt, bei welcher sich die geforderte Temperatur in der Siegelfläche einstellt und somit eine gute Siegelnaht zu erwarten ist. Dabei sind die Anforderungen an die Siegelgeschwindigkeit aus Kapitel 4.1.2 berücksichtigt. Die Temperatur des Siegelwerkzeugs kann weiterhin nicht beliebig hoch werden, da der Oberflächenwerkstoff der Pouch-Folie sonst schmelzen kann. Als Obergrenze wird daher 10 K unterhalb der Schmelztemperatur des Oberflächenwerkstoffes angenommen. Mit diesen Erkenntnissen kann dann in Kapitel 4.4.3 die Umsetzung zum flexiblen Heißsiegelmodul erfolgen, welches abschließend im vorliegenden Kapitel dazu dient, Validierungsversuche für das dynamische Heißsiegelmodell durchzuführen. Sollten signifikante Differenzen zwischen Modell und Versuch

sichtbar sein, so wird das Modell iterativ angepasst. In Abbildung 5.1 ist der Ablauf der Vorentwicklung für das flexible Heißsiegeln grafisch dargestellt.

Die Heißsiegelversuche mit Heißsiegelbalken erfolgen vollfaktoriell mit den zu variierenden Parametern Siegeltemperatur und Siegelzeit. Die Pouch-Folie ist vom Typ D-EL408PH(3) der Firma Dai Nippon Printing Co., Ltd. Der Aufbau der Folie ist in Abbildung 5.2 grafisch dargestellt. Die Ergebnisse der Dichtigkeit- und Abziehtests wurden in Kapitel 4.4.3 diskutiert. Um diese identifizierten Produktionsparameter in die Prozessgröße P_T übersetzen zu können, wird der Prozess im FEM-Wärmestrommodell abgebildet. In Abbildung 5.3 ist der Aufbau des Modells dargestellt, die Pouch-Folie wird dabei der oben genannten Folie nachempfunden, lediglich die jeweils 3 μm dicken Kleberschichten wurden ignoriert. Die Werkstoffgrößen Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitwert sind mit den jeweiligen Quellen im Anhang in Tabelle A.2 gelistet. Für die Simulation der freien Konvektion wurde die entsprechende Funktion von Comsol Multiphysics genutzt. Die Umgebungstemperatur wurde innerhalb der Anlage gemessen und beläuft sich auf 27 °C bzw. 300,15 K. Der Wärmeleitwiderstand aufgrund des thermischen Kontakts zwischen Heißsiegelbalken und Pouch-Folie wird zunächst nach (Abbot 2012) auf 0,03 $\text{m}^2\text{K/W}$ geschätzt. Für die Netzerstellung wurde die Funktion „Physik gesteuertes Netz“ in der Auflösung fein genutzt.

Die Validierung des Modells erfolgt mit Messungen des Temperaturverlaufs beim Heißsiegeln und dem Vergleich dieses Verlaufs mit dem Modell. Dazu wird ein sehr dünnes Thermoelement des Typs K in der Größe 2 x 0,127 mm verwendet. Dessen Messspitze



Abbildung 5.1: Vorgehen zur Entwicklung des flexiblen Siegelprozesses. Hellblau markierte Teilschritte sind nicht Teil der vorliegenden Arbeit

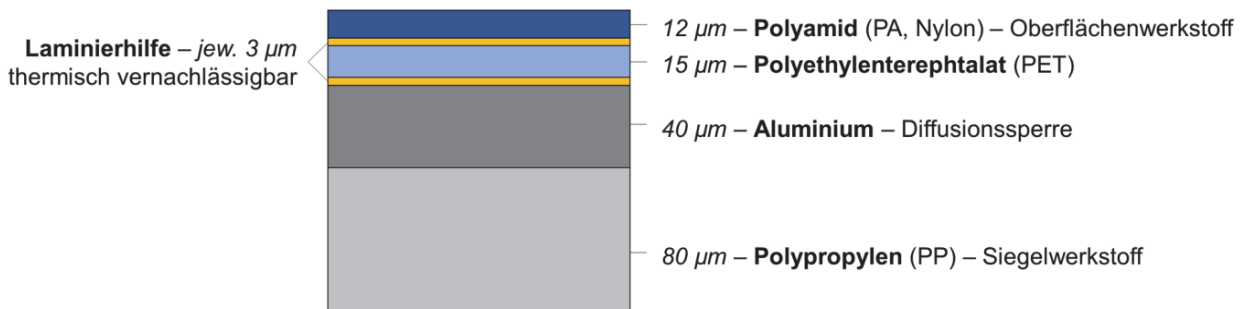


Abbildung 5.2: Aufbau der verwendeten Pouchfolie nach Datenblatt (Dai Nippon Printing Co., Ltd., 2012)

hat einen Durchmesser von lediglich 0,127 mm, sodass die Anwesenheit des Thermoelements nur minimale, vermutlich vernachlässigbare Auswirkungen auf den Temperaturverlauf in der Siegelfläche aufweist. In Abbildung 5.4 ist die Messspitze des verwendeten Thermoelementtyps in Vergleich mit einem handelsüblichen Streichholz zu sehen. Es werden fünf Wiederholungen eines Siegelversuchs mit in der Siegelfläche platziertem Thermoelement durchgeführt, der Temperaturverlauf wird dabei gespeichert. Die Siegeltemperatur beträgt beim Versuch 185 °C, die Siegelzeit 3 Sekunden. Im Anschluss werden die Temperaturverläufe miteinander verglichen. Lediglich der Versuch mit dem schnellsten Anstieg der Temperatur wird zur Validierung des Modells verwendet.

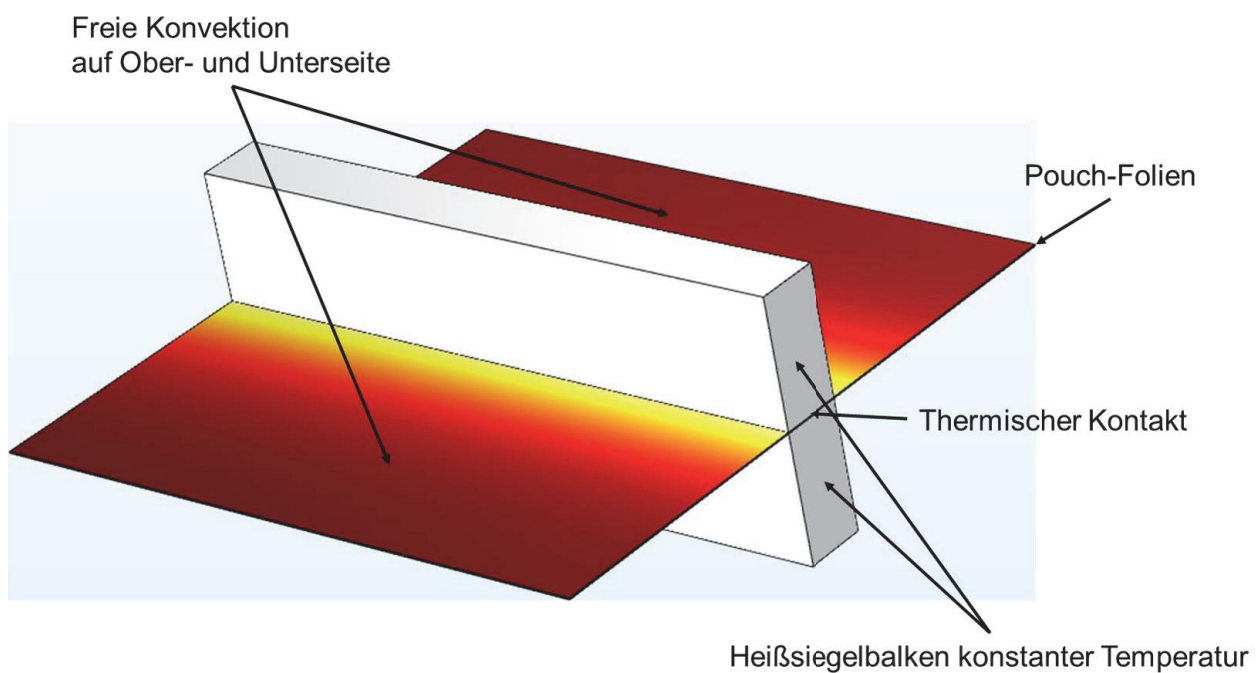


Abbildung 5.3: Aufbau des statischen Siegelmodells mit Heißsiegelbalken



Abbildung 5.4: Messspitze des verwendeten Thermoelements im Vergleich zu einem handelsüblichen Streichholz

det, da ein langsamerer Temperaturanstieg auf Störeffekte wie schlechte Positionierung des Thermoelements deutet. Es existiert jedoch kein Fehler, der die Temperatur schneller ansteigen lassen würde, weshalb der Versuch mit dem schnellsten Temperaturanstieg das realistischste Ergebnis liefert. Im Anschluss wird der Temperaturverlauf aus dem Versuch mit dem modellierten Verlauf verglichen. Dabei wird deutlich, dass die Temperatur im Modell deutlich langsamer ansteigt, als im Versuch. Daraus folgt, dass der Wärmeleitwiderstand zwischen Siegelbalken und Folie zu groß gewählt wurde. Diese Größe wurde in der Folge angepasst. Bei einem Widerstand von $0,004 \text{ m}^2\text{K/W}$ ergibt sich eine Übereinstimmung von Modell und Versuch. In Abbildung 5.5 sind die Temperaturverläufe gegenübergestellt. Bei der Temperaturmessung im Versuch ergibt sich ein möglicher Fehler von $\pm 1 \text{ K}$ laut Herstellerdatenblatt des Thermoelements. Die Abweichung zwischen den Temperaturverläufen ergibt sich zu maximal $4,6 \text{ K}$, die Zeitabweichung beträgt maximal $0,2 \text{ Sekunden}$. Durch die geringe Zeitabweichung, welche eine Größenordnung unterhalb der Prozesszeit liegt, wird erkennbar, dass das Modell ausreichend gute Ergebnisse liefert. Das Modell gilt damit als ausreichend genau validiert und liefert folgend die Prozessgröße P_T für die Dichtigkeits- und Abziehproben. Nun können die Dichtigkeiten und Abziehfestigkeiten auf P_T bezogen werden anstatt auf Siegeltemperatur und Siegelzeit. Diese Verläufe sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Bei den Abziehversuchen werden die Unsicherheiten auf die Toleranz der Probenbreite von $15 \pm 1 \text{ mm}$ zurückgeführt. Die Temperaturunsicherheit aus dem Modell leitet sich aus der maximalen Temperaturabweichung zwischen Modell und Versuch ab und beläuft sich auf $1,06 \%$ bezogen auf P_T . Für die Dichtigkeits tests liegen

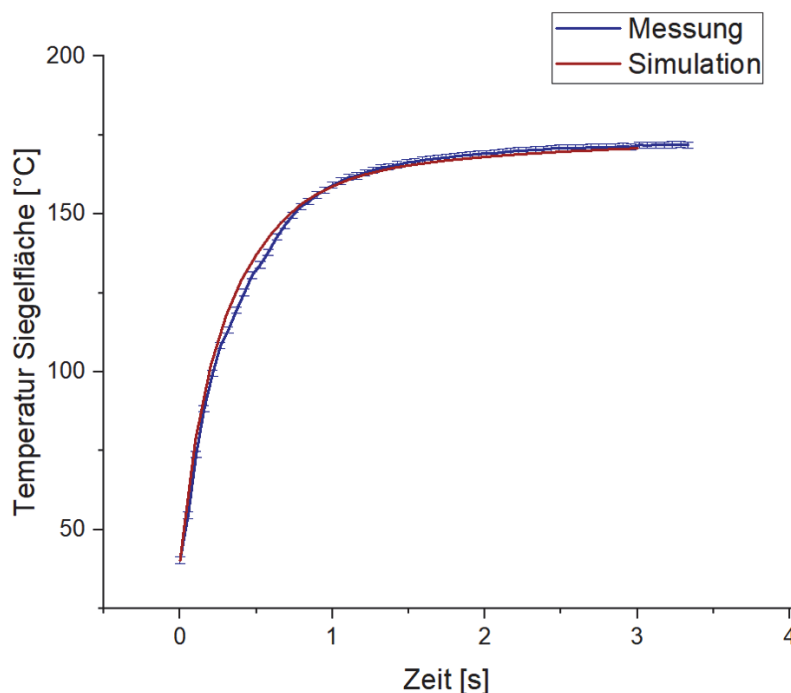


Abbildung 5.5: Verlauf der Temperatur in der Siegelfläche aus Messung und Simulation

keine Toleranzen vor. In dieser Darstellung wird deutlich, dass alle verwertbaren Proben die Dichtigkeitsanforderung nach Kapitel 3.1 erfüllen, die in Kapitel 3.1 geforderte Abziehfestigkeit wird erreicht, sobald die Temperatur in der Siegelfläche 96 % der recherchierten Schmelztemperatur überschreitet. Dies gilt also zusammen mit dem verwendeten Siegeldruck von 1,5 bar als Anforderung für den zu entwickelnden dynamischen Siegelprozess. Um den dynamischen Prozess zu modellieren, werden zunächst

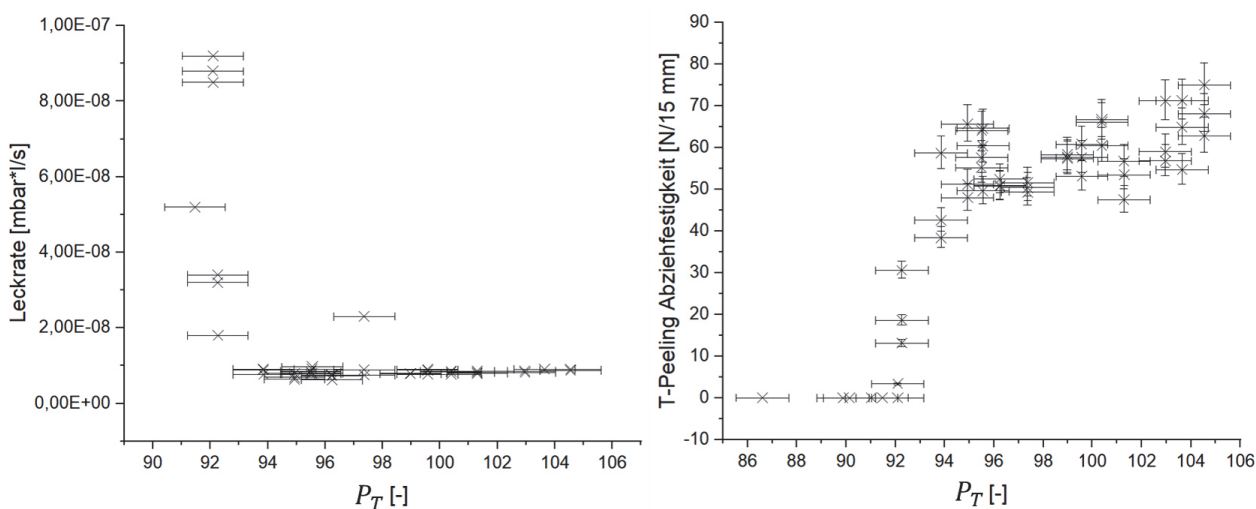


Abbildung 5.6: Leckrate (links) und Abziehfestigkeit (rechts) der Siegelproben bezogen auf die errechnete Prozessgröße P_T

die Kontaktflächen der Heißsiegelrollen mit der Pouch-Folie ermittelt. Dazu werden Versuche durchgeführt, bei welchen Rollen mit verschiedenen Durchmessern mit definierten Kräften auf Pouch-Folie gedrückt werden. Die Rollen sind dabei mit Farbe bestrichen, welche einen Abdruck auf der Folie hinterlässt. Durch Vermessung des Abdrucks kann dann die Kontaktfläche ermittelt werden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.7 skizziert, in Die ermittelte Kontaktbreite wird im Anschluss in ein dynamisches Heißsiegelmodell übernommen. In Abbildung 5.8 ist der Aufbau des Modells mit dessen Randbedingungen zu sehen.

Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Druckversuche für zwei Zylinder der Durchmesser 9 mm und 12 mm aufgelistet, die Länge der Zylinder beträgt jeweils 30 mm. Durch lineare Interpolation der Ergebnisse werden Heißsiegelrollen von 10 mm Durchmesser gewählt, die Anpresskraft der Rollen wird auf ca. 50 N festgelegt. Damit wird eine Kontaktbreite von ca. 1 mm bei einem Druck von ca. 1,5 bar erreicht. Zur Aufbringung der definierten Kraft wurde die in den Zugversuchen verwendete *zwickiLine Z5.0* der Firma *Zwick Roell* verwendet. Die ermittelte Kontaktbreite wird im Anschluss in ein dynamisches Heißsiegelmodell übernommen. In Abbildung 5.8 ist der Aufbau des Modells mit dessen Randbedingungen zu sehen.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Druckversuche zur Kontaktflächenermittlung der Heißsiegelrollen

Anpresskraft:		10 N	50 N	100 N	150 N	200 N
Rollen- durchmes- ser 9 mm	Breite des Kontakts [mm]	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1
	resultie- render Druck [bar]	0,4	1,85	3,33	4,84	6,25
Rollen- durchmes- ser 12 mm	Breite des Kontakts [mm]	0,8	1,2	1,5	1,7	1,8
	resultie- render Druck [bar]	0,4	1,4	2,22	2,94	3,70

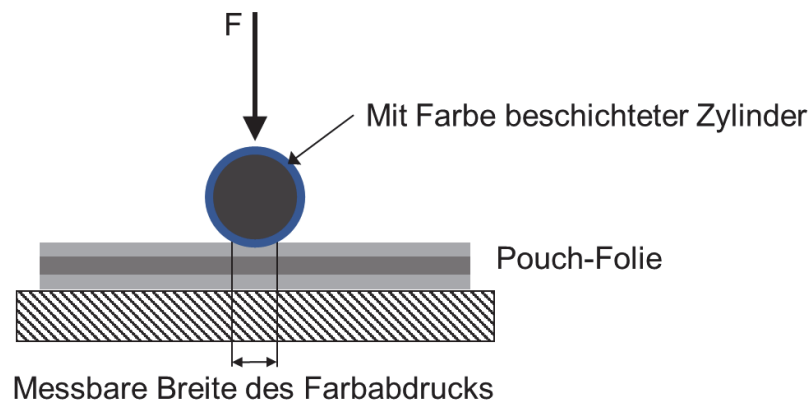


Abbildung 5.7: Prinzipskizze des Aufbaus zur Kontaktflächenermittlung

Der Kontakt zwischen Siegelrollen und Folie wird nicht modelliert, da die Simulation damit nicht von der verwendeten Software abgebildet werden kann. Stattdessen wird angenommen, dass sich die Temperatur auf der Oberfläche der Folie als Heißsiegeltemperatur ergibt und diese konstant ist. Dieses so modellierte Kontaktfeld bewegt sich mit einer anpassbaren Geschwindigkeit über das Modell. Der thermische Kontakt wird zwischen der PET- und der Aluminiumschicht in der Pouch-Folie modelliert, der Wert wird aus dem statischen Modell (s.o.) übernommen. Die Vernetzung erfolgt ebenfalls analog zum statischen Heißsiegelmodell (s.o.). In Abbildung 5.9 ist das Temperaturfeld der Oberfläche als Randbedingung zu verschiedenen Zeitpunkten in der Simulation zu sehen. Die Positionsdifferenz zwischen den Zeitpunkten ergibt sich anhand der einstellbaren Siegelgeschwindigkeit. Die Konvektion beschränkt sich auf die Flächen, welche

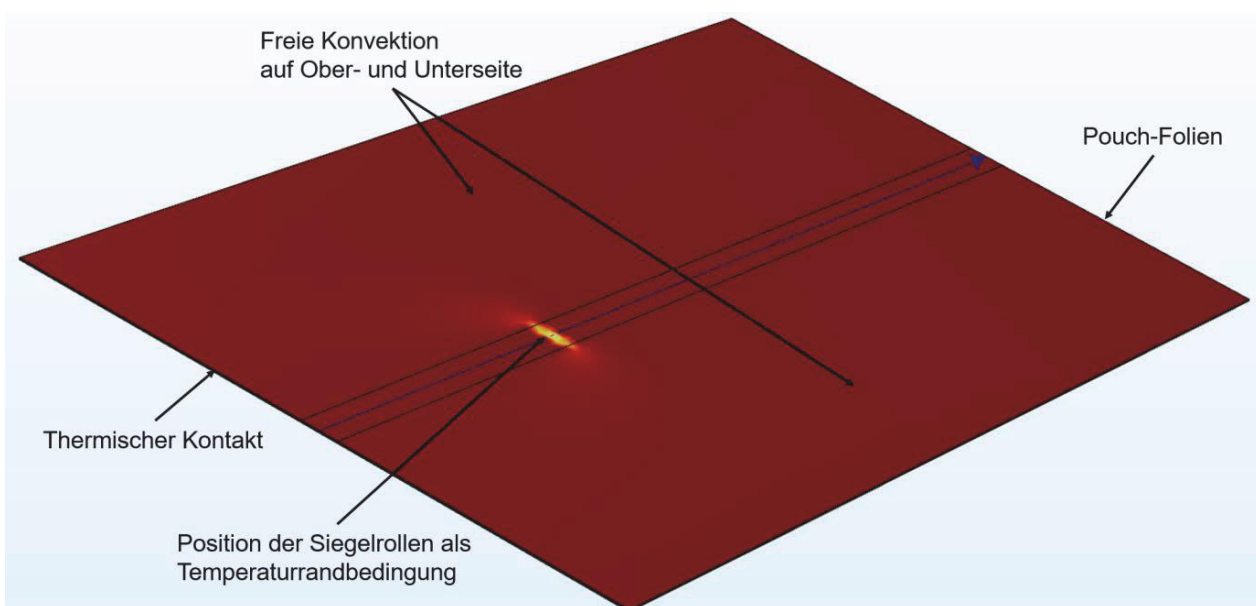


Abbildung 5.8: Aufbau des dynamischen Heißsiegelmodells

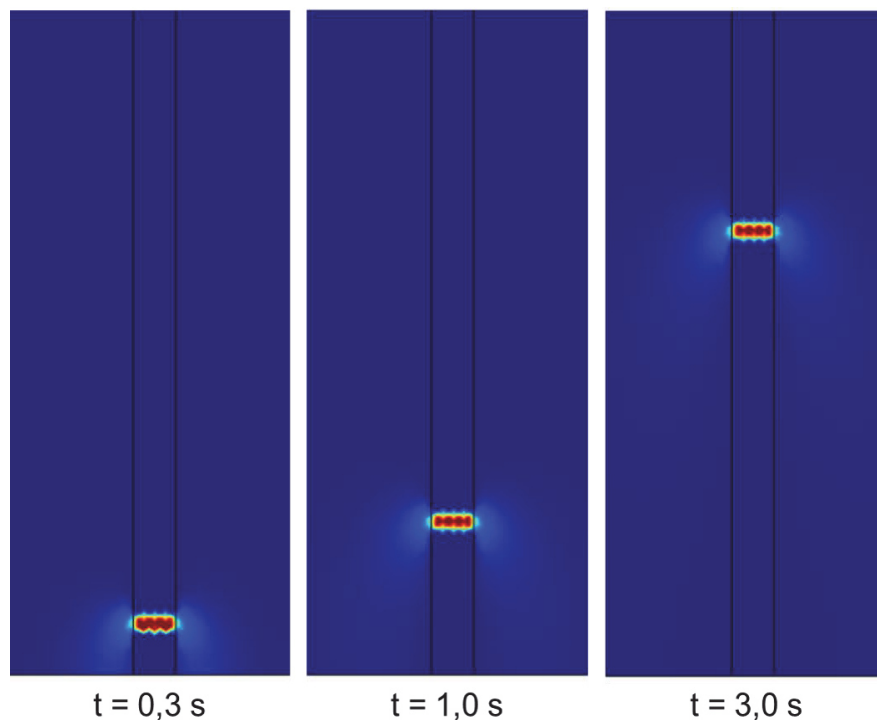


Abbildung 5.9: Oberflächentemperatur im dynamischen Heißsiegelmodell zu drei verschiedenen Zeitpunkten

nicht von den Siegelrollen berührt wird. Auch dies ist eine Näherung, da der Wärmestrom durch Konvektion im Vergleich zur Wärmeleitung jedoch deutlich geringer ausfällt, scheint diese Näherung zulässig und wird durch die Validierung des Modells überprüft. Mittels des validierten Modells kann dann überprüft, welche Siegelgeschwindigkeit und Siegeltemperatur eingestellt werden muss, um $P_T > 96 \%$ zu erreichen.

Die minimale Siegelgeschwindigkeit wird durch die Anforderungen an den Siegelprozess vorgegeben zu min. 20 mm/s. Die Validierung des Modells kann analog zur Validierung des statischen Heißsiegelmodells erfolgen: Mittels Thermoelement mit einer 0,127 mm dicken Messspitze (s.o.), welches zwischen den Pouch-Folien platziert wird, kann der Temperaturverlauf in der Siegelebene gemessen und im Anschluss mit dem modellierten Verlauf verglichen werden. Dies kann jedoch erst nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Anlage erfolgen.

5.4 Anlagenentwicklung

Nach der Vorentwicklung des flexiblen Heißsiegels mittels Rollnaht in Kapitel 4.3.3 wird im Folgenden die Anlage zur Prozesstechnik entwickelt. Dieses Kapitel fasst dabei die relevanten Inhalte von (A_Mühlenkamp 2021) sowie (A_Palendran 2022) zusammen.

Zunächst erfolgt die Auslegung des Siegelrollnahtwerkzeugs. Der Rollendurchmesser wurde aus fertigungstechnischen Gründen und mit den Ergebnissen der Drucktests aus Kapitel 4.3.3 auf 10 mm festgelegt, eine Anpresskraft von 50 N wurde ebenfalls identifiziert. In Abbildung 5.10 sind verschiedene Ansichten des Siegelwerkzeugs zu sehen. Dieses besteht aus einem oberen Teil, einem unteren Teil sowie der Grundplatte. Am Ende des oberen und unteren Werkzeugteils ist jeweils eine Siegelrolle befestigt. Dabei werden zur Befestigung Langlöcher verwendet, um die Ausrichtung der Siegelrollen zueinander einstellen zu können. Die Grundplatte ist dafür konzipiert, um an einem Roboter als Endeffektor befestigt zu werden. Weiterhin ist in der Grundplatte eine Linearführung angebracht, um einen Hub des unteren Werkzeugteils zuzulassen. Dieser Hub wird von einem Pneumatikzylinder durchgeführt, welcher ebenfalls an der Grundplatte befestigt ist. Das obere Werkzeugteil ist starr mit der Grundplatte verbunden. Die über Nadellager gelagerten Siegelrollen werden dabei über gewickelte hochtemperaturbeständige Heizdrähte mit einem Durchmesser von 0,1 mm beheizt. Diese Heizdrähte werden in mehreren Wicklungen um einen Kern gewickelt, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen.

Die Regelung der Temperatur wird von der Anlagensteuerung, einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) übernommen. In Abbildung 5.11 ist die Regelstrecke der

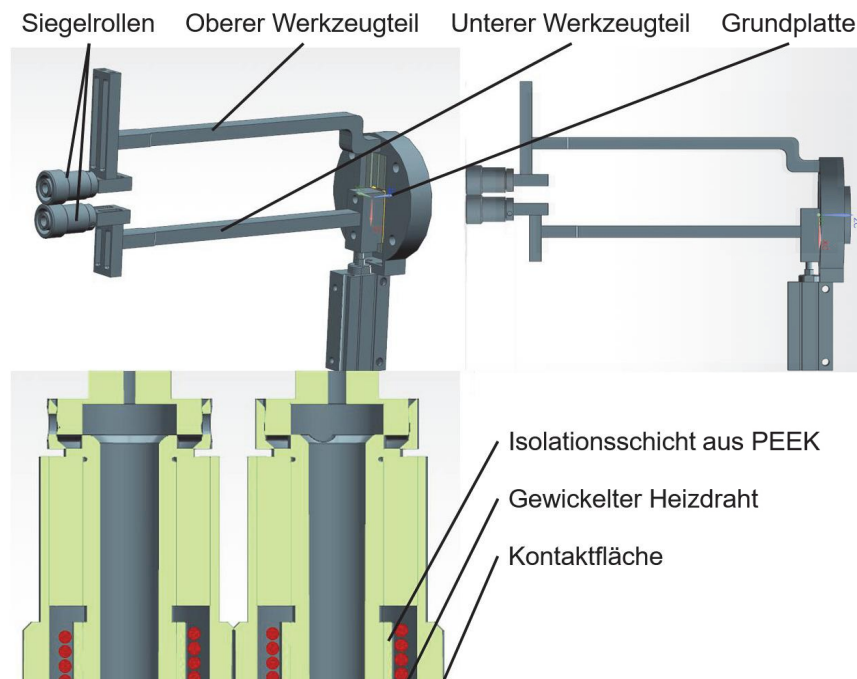


Abbildung 5.10: Siegelwerkzeug als Gesamtansichten (oben) und Schnittansicht durch die Siegelrollen (unten)

Heizung dargestellt. Die Temperatur wird von einem Thermoelement an der Siegelrolle gemessen, welches von der SPS ausgelesen wird. Über einen vorgefertigten PID-Reglerbaustein regelt die SPS den Ausgangsstrom eines Leistungsnetzteils bei einer konstanten Spannung von 10 V, sodass die Soll-Temperatur möglichst schnell erreicht wird, die Stromstärke jedoch maximal 3 A beträgt.

Zur Führung des Siegelwerkzeugs werden verschiedene Alternativen betrachtet: Das Werkzeug wird im gewünschten Siegelpfad komplett um die Zelle geführt (Vorschub durch Siegelwerkzeug), das Siegelwerkzeug wird teilweise um die Zelle geführt und die Zelle ändert ihre Orientierung zwischen verschiedenen Siegelschritten ihre Orientierung durch Rotation (Vorschub ebenfalls durch Siegelwerkzeug), oder die Zelle rotiert kontinuierlich und die Position und Orientierung des Siegelwerkzeugs werden dabei so variiert, dass dieses dem gewünschten Siegelpfad folgt (Vorschub durch Rotation der Zelle). Durch eine qualitative Betrachtung der Umsetzbarkeit wird die beste Alternative ausgewählt. Im ersten Fall der vollständigen Umfahrung der Zelle durch das Siegelwerkzeug ist die Zugänglichkeit kritisch: das Siegelwerkzeug muss 360° um die Zelle fahren, darf dabei nicht kollidieren und muss fortwährend die radiale Position sowie die Winkelorientierung zur Zelle ändern. Dies ist technisch möglich, ist jedoch mit einem großen konstruktiven und technischen Aufwand verbunden.

Eine Kombination von rotierender Zelle zur Umorientierung (beispielsweise viermalige Drehung um 90° jeweils mit Siegelvorgängen zwischen den Rotationen) ist technisch einfach umzusetzen und setzt die Zugänglichkeit der Zelle auf nur einer Seite voraus, da diese immer so orientiert wird, dass die zu versiegelnde Seite dem Siegelwerkzeug zugewandt ist. Der Nachteil bei dieser Methode ist das Absetzen des Siegelwerkzeugs zwischen den verschiedenen Siegelvorgängen, was bei Ungenauigkeiten in der Bahnplanung zu sich schlecht überlagernden Siegelnähten und Undichtigkeiten führen kann.

Wird die Zelle gedreht und das Siegelwerkzeug entsprechend orientiert, so ist die Zugänglichkeit immer gegeben. Durch die Variation von Winkel und Abstand des Siegelwerkzeugs zur Zelle und über eine entsprechende Anpassung der Rotationsgeschwin-

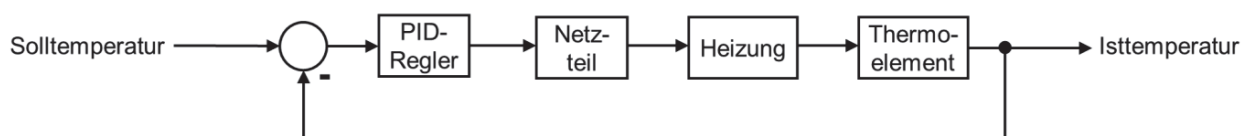


Abbildung 5.11: Reglerstrecke der Heizung

digkeit lässt sich so eine durchgehende Siegelnaht auf sämtlichen Siegelpfaden erreichen. Daher wird diese Variante zur Umsetzung ausgewählt. In Abbildung 5.12 ist der Vorgang zur Ermittlung des Abstands und Winkels des Siegelwerkzeugs zur Zelle anhand eines Beispielformates dargestellt. Es werden aus Geometriedaten eine Funktion $s(\varphi)$ (Abstand) sowie $\alpha(\varphi)$ (Winkel) in Abhängigkeit der Winkelposition φ der Zelle abgeleitet, welche zur Positionsregelung des Werkzeugs verwendet werden. Die Werte werden im iterativen Verfahren ermittelt und anschließend linear interpoliert. Das Vorgehen und die praktische Umsetzung sind in (A_Palendran 2022) beschrieben.

Es ergeben sich daher die Hauptfunktionen des Verpackmoduls zu

- Fixieren und Drehen des Zellstapels
- Positionieren des Siegelwerkzeugs
- Temperatur des Siegelwerkzeugs regeln

Die Nebenfunktionen ergeben sich zu:

- Speicherung der Folieneinzelblätter
- Greifen des Zellstapels vom Werkstückträger
- Positionieren der Folie auf und unter dem Zellstapel

Für diese werden im Folgenden Lösungen erarbeitet.

Für die Funktion Fixieren und Drehen des Zellstapels wird zunächst ein geeigneter Antrieb zur Drehung benötigt. Hier existieren viele gleichwertige, kommerziell verfügbare Alternativen, es wurden unbegrenzt drehbare Drehmodule mit Servomotor ausgewählt

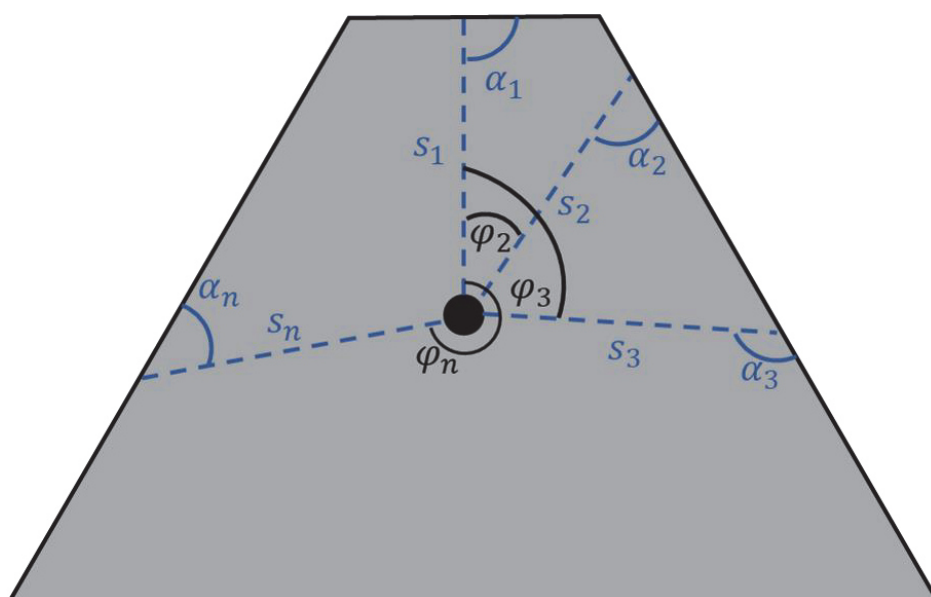


Abbildung 5.12: Verfahren zur Ermittlung von $s(\varphi)$ und $\alpha(\varphi)$ durch iteratives Drehen der Kontur nach (A_Palendran 2022)

(A_Mühlenkamp 2021, S. 23). Diese können den Zellstapel mit einer regelbaren Geschwindigkeit drehen und gleichzeitig den absoluten Drehwinkel messen, was für die Positionsregelung des Siegelwerkzeugs nötig ist. Zum Fixieren des Zellstapels verschiedener Formate wird ein entsprechend flexibles System benötigt. Dazu wird eine Platte mit Lochraster auf die Drehmodule montiert. In diesen Löchern können magnetisch steckbare Pins positioniert werden. Diese Pins verfügen über einen Vakuumbreifer, welcher die Verpackungsfolie ansaugen kann, um deren Position sicher halten zu können. Durch das Raster können diese Pins beliebig angeordnet werden, sodass die Fixierung flexibel an das jeweilige Zellformat angepasst werden kann (A_Mühlenkamp 2021, S. 23f). In Abbildung 5.13 ist der Aufbau mit Drehmodul, Rasterplatte und Pins dargestellt. Um die Ablage des Zellstapels zu ermöglichen und eine fixierende Kraft auf den Zellstapel auszuwirken, wird der obere Teil der Fixierung, welcher gleich aufgebaut ist wie der oben erwähnte untere Teil mit Drehmodul, Rasterplatte und Pins, an pneumatischen Zylindern angebunden. Dadurch wird ein Vertikalhub der oberen Fixierung ermöglicht. In Abbildung 5.14 ist der Gesamtaufbau der Fixierung dargestellt.

Zur Positionierung des Siegelwerkzeugs werden verschiedene Alternativen untersucht. Es werden mindestens drei Freiheitsgrade für die Positionierung benötigt, um Abstand und Winkel des Werkzeugs bei verschiedenen hohen Zellstapeln regeln zu können. Um

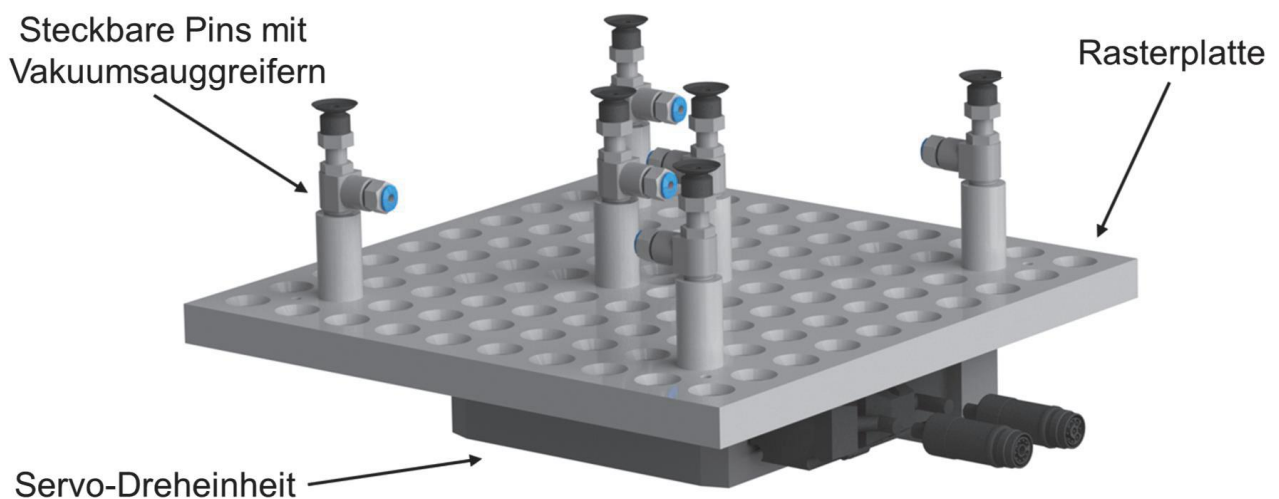


Abbildung 5.13: Stapelablage mit Dreheinheit und umpositionierbaren Sauggreifern

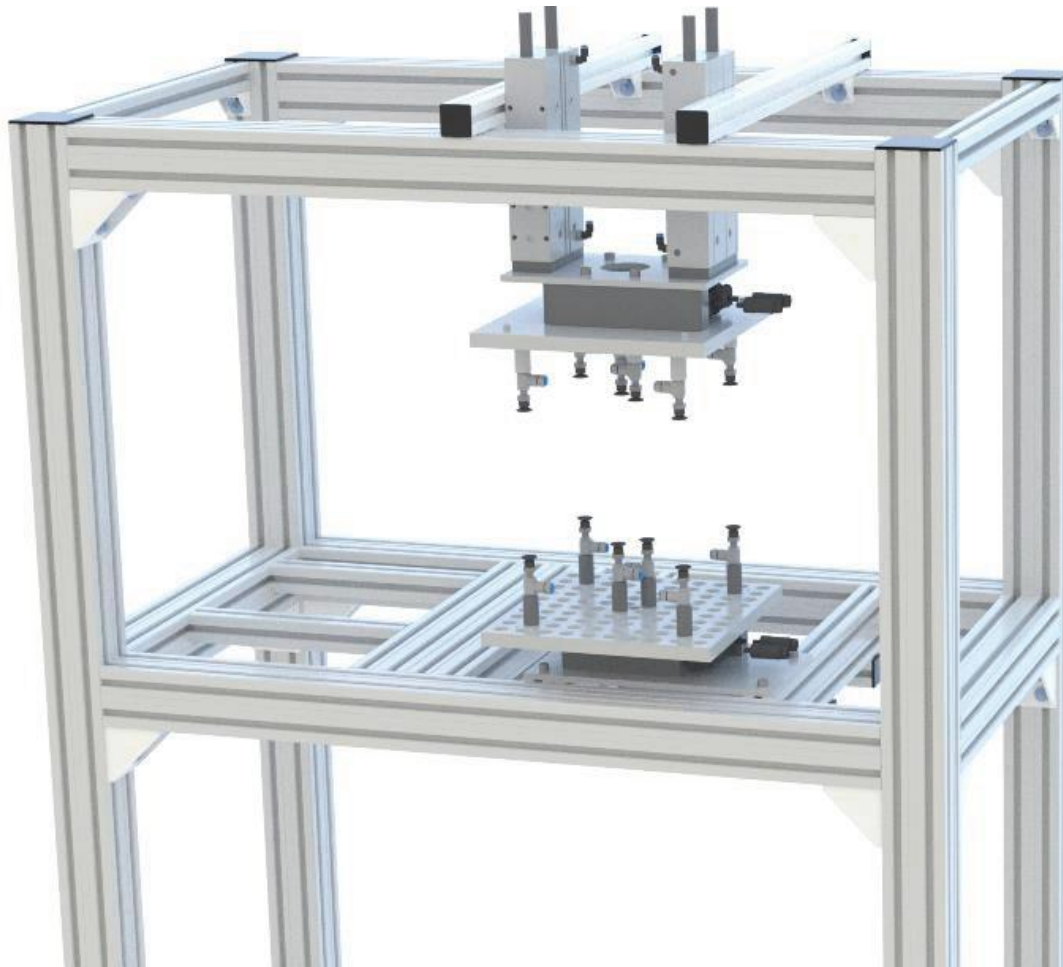


Abbildung 5.14: Zellstapelfixierung des Verpackmoduls mit Dreheinheiten

aber auf Ungenauigkeiten in der Orientierung der Aktorik ausgleichen zu können, werden jedoch drei translatorische Freiheitsgrade und 1 rotatorischer Freiheitsgrad als Anforderung festgelegt. Die Positionierwiederholgenauigkeit darf maximal 0,1 mm betragen, um dem vorgegebenen Siegelpfad ausreichend genau zu folgen. Die Bewegungsgeschwindigkeitsanforderung lässt sich durch eine geometrische Betrachtung der größten zu fertigenden Zelle und die Anforderung der Versiegelung in maximal 10 Sekunden pro Seite abschätzen. Der Siegelpfad dieser Zelle beschreibt ein Rechteck mit Seitenlängen von ca. 25 cm und 12 cm. Vom Mittelpunkt der Zelle als Referenzpunkt ist die lange Seite also 6 cm entfernt. Die Ecken dieser Seite sind ca. 14 cm vom Mittelpunkt entfernt. Das Siegelwerkzeug, welches lediglich die Bewegung in radialer Richtung durchführt (tangentielle Bewegung entsteht durch die Drehung der Zelle), muss sich also in der Hälfte der Siegelzeit für eine Seite, ergo in 5 Sekunden, von der Ecke zum Mittelpunkt der Seite bewegen. Die Distanz beträgt $14 - 6 \text{ cm} = 8 \text{ cm}$. Damit wird eine Mindestgeschwindigkeit von $8 \text{ cm} / 5 \text{ s} = 16 \text{ mm/s}$ festgelegt. Es ist davon auszugehen,

dass sämtliche kommerziell verfügbare Aktorsysteme mit einer vorausgesetzten Bewegungsreichweite von ca. 50 cm die Anforderungen an Wiederholgenauigkeit und Bewegungsgeschwindigkeit erfüllen, weshalb diese nicht als Bewertungskriterien betrachtet werden. Bewertet werden die Alternativen nach ihrem Preis, ihrer Flexibilität und der Umsetzbarkeit im Produktionsmodul.

Verglichen werden Horizontalknickarmroboter (SCARA), Vertikalknickarmroboter sowie Linearkompaktmodul. Die Ergebnisse des Vergleichs werden in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Der Preis von geeigneten Linearkompaktmodulen und SCARA ist ähnlich im Bereich von 9.000 € - 15.000 € und damit in der Regel günstiger als Vertikalknickarmroboter, welche sich in einer Preisspanne von 14.000 – 23.000 € in der geforderten Größe bewegen. Daher wird der Preis für SCARA sowie Linearkompaktmodul mit sehr gut bewertet, für Vertikalknickarmroboter mit gut. SCARAs erreichen alle geforderten Freiheitsgrade und können jede Position in zwei verschiedenen Konfigurationen erreichen. Die Flexibilität wird daher mit gut gewertet. Vertikalknickarmroboter haben bis zu sechs Freiheitsgrade und können jede Position in bis zu sechs verschiedenen Konfigurationen erreicht werden. Dadurch lässt sich der Roboter besser in einem beengten Raum einsetzen, da mehrere Konfigurationsalternativen bestehen, womit Kollisionen vermieden werden können und Punkte im Raum erreicht werden können, welche eventuell mit anderen Aktoren in anderen Konfigurationen nicht erreicht werden können. Daher wird die Flexibilität der Vertikalknickarmroboter mit sehr gut bewertet. Linearkompaktmodule erreichen bis zu drei translatorische Freiheitsgrade, ein rotatorischer müsste ergänzt werden, um die Anforderungen zu erfüllen. Linearkompaktmodule sind eindeutig, das heißt, eine Position kann nur in einer Konfiguration erreicht werden. Damit wird der Lösungsraum eingeschränkt und die Flexibilität wird als befriedigend gewertet. Die Umsetzbarkeit der SCARA-Lösung ist ohne weitere Maßnahmen gegeben

Tabelle 5.3: Bewertung der Alternativen zur Umsetzung der Funktion "Positionieren des Siegelwerkzeugs"

	SCARA	Vertikalknickarm-roboter	Linearkompakt-modul
Preis	++	+	++
Flexibilität	+	++	o
Umsetzbarkeit	+	++	--
Gesamt	+	++	o

und wird als gut bewertet. Mit relativ kleiner Aufstellfläche und herstellerseitigen Standardschnittstellen zur Anlagensteuerung kann die Umsetzung schnell und einfach erfolgen. Vertikalknickarmroboter können aufgrund der unter „Flexibilität“ erwähnten Vorteile mit weniger Randbedingungen mechanisch im Produktionsmodul untergebracht werden. Weiterhin verfügen die Steuerungen von Vertikalknickarmroboter in der Regel über Schnittstellen, welche die aktive Positionsregelung über die Anlagensteuerung einfach ermöglichen. Dies ist bei SCARAs nicht der Fall, dort ist also mit erhöhtem Programmieraufwand zu rechnen. Die Umsetzbarkeit mit Vertikalknickarmrobotern wird mit sehr gut bewertet. Für Linearkompaktmodule ist die Umsetzbarkeit mangelhaft. Die Aufstellfläche ergibt sich aus der geforderten Reichweite von 50 cm zu mindestens 50 cm x 50 cm, was für ein kompaktes Produktionsmodul nicht angemessen ist. Die Kollisionsvermeidung mit beispielsweise der Fixierung wird ebenfalls durch die Bauart von Kompaktmodulen erschwert. Der rotatorische Freiheitsgrad muss technisch ergänzt werden, was ebenfalls mit großem Aufwand verbunden ist. Da sich dadurch die Gesamtkinematik ändert, steigt der Programmieraufwand ebenfalls an.

Insgesamt ist die Umsetzung mit Vertikalknickarmroboter die am besten bewertete Alternative.

In Abbildung 5.15 ist das gesamte Produktionsmodul als Konstruktionsmodell dargestellt.

Die Speicherung der Folien wird in (A_Mühlenkamp 2021, S. 25) genauer untersucht, die gewählte Alternative ist die Speicherung in Magazinen, welche auf den in dem Stapelmodul verwendeten Magazinen basiert. Analog dazu wird die Positionierung der Folie auf und unter dem Zellstapel mit einem SCARA-Roboter mit Catenary-Greifer vorgesehen. Dieser SCARA-Roboter ist ebenfalls mit einem Greifer für die versiegelte Zelle ausgestattet, welcher diese gegriffen und dann im Werkstückträger, also in dem Greifer des zentralen Handlingroboters, positioniert werden. (A_Mühlenkamp 2021, S. 25f)

Die Hilfsfunktion Zellstapel vom Werkstückträger greifen wird ebenfalls in (A_Mühlenkamp 2021, S. 26) hergeleitet. Hier wird ein pneumatisch betätigter Greifer gewählt, welcher an einer Linearachse befestigt ist und durch die Aussparungen des Werkstückträgers den Zellstapel greift und auf die Stapelfixierung des Verpackmoduls positioniert. Dabei wird zuvor ein Pouchfolienblatt auf der Stapelfixierung positioniert, sodass sich zu diesem Zeitpunkt bereits eine Folie unter dem Zellstapel befindet.

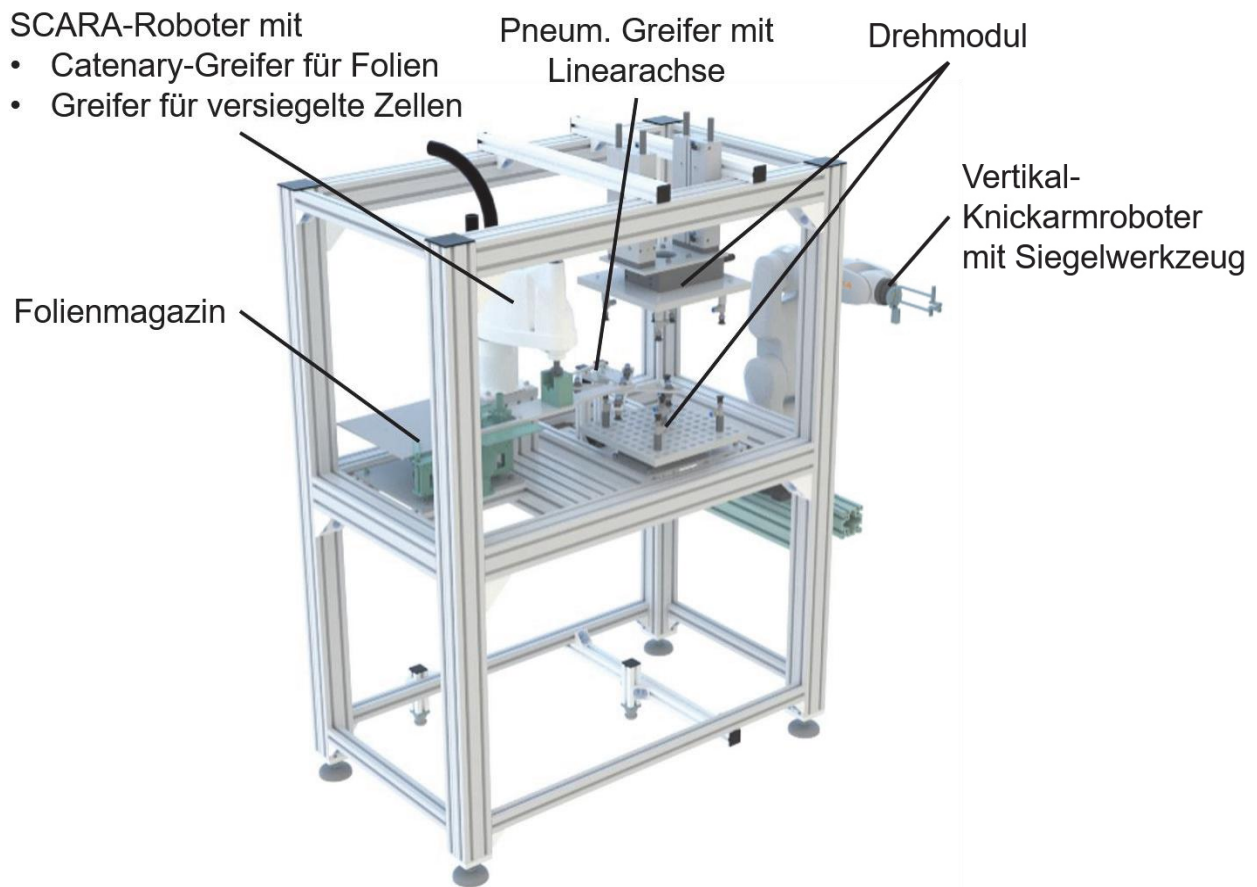


Abbildung 5.15: Konstruktionsmodell des flexiblen Verpackmoduls

Der Gesamttablauf der Anlage ergibt sich also zu:

- Positionieren eines Pouchfolienblatts auf der Stapelfixierung
- Greifen des Zellstapels im Werkstückträger, Werkstückträger öffnet
- Positionieren des Zellstapels auf der bereits positionierten Folie auf der Stapelfixierung
- Positionieren der zweiten Folie auf dem Zellstapel
- Stapelfixierung schließt, Siegelwerkzeug wird beheizt und auf Werkstück positioniert
- Werkstück wird mit festgelegter Winkelgeschwindigkeit gedreht, die das Siegelwerkzeug wird entsprechend der Winkelposition positioniert und orientiert
- Stapelfixierung öffnet, Zelle wird entnommen und im Werkstückträger positioniert

5.5 Weiteres Vorgehen

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Produktionsmodul zum vollflexiblen Versiegeln sowie der zugehörige dynamische Heißsiegelprozess sind als Grundlage für weitere Arbeiten zur Umsetzung der Technologie zu sehen. Dabei sind bereits erste Teilsysteme umgesetzt und getestet worden, so beispielsweise die PID-Regelung für einen Heizdraht sowie die Synchronisation von Roboter- zu Drehachsbewegung. Eine thermische Auslegung der Siegelrollen und des zugehörigen Heizkörpers, die Bauteilauswahl und die Umsetzung dessen stehen jedoch aus. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des Siegelwerkzeuges kann das dynamische Heißsiegelmodell aus Kapitel 5.3 validiert oder ggf. angepasst werden, um die Produktionsparameter zu ermitteln. Abschließende Validierungen an der Anlage mit Dichtigkeitstests und Abziehfestigkeitsversuchen schließen die Entwicklung ab. Nach der erfolgreichen Validierung von Anlage und Prozess kann das Verpackmodul aus Kapitel 4 durch das vollflexible, dynamische Heißsiegelmodul ersetzt werden, dazu muss die Programmierung des flexiblen Versiegelmoduls im Kontext der Gesamtanlage erfolgen. Die Integration erfordert weiterhin eine entsprechende Programmierung des zentralen Handlingroboters, der Gesamtprogrammablauf bedarf im Sinne der Modularität keiner Anpassung. Abschließende Produktionstests in der Gesamtanlage bilden dann die Grundlage für die finale Bewertung der dynamischen Versiegelung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Gemäß der Aufgabenstellung wurden Produktionsmodule für die flexible Assemblierung von Lithium-Ionen-Zellen und die zugehörigen Prozesse zum Stapeln, Kontaktieren und Verpacken der Pouch-Zellen entwickelt.

Zunächst wurde der Raumbedarf für die einzelnen Module anhand der Produktgrößen abgeschätzt. In einer Variantenbetrachtung wurde dann ein Gesamtraumkonzept für die Assemblieranlage abgeleitet. Mit dem Raumkonzept konnte dann eine Auswahl für den Materialtransport zwischen den Modulen getroffen werden, hier zeigte sich ein Vertikalknickarmroboter als beste Alternative.

Für den Fertigungsschritt Stapeln wurde ein flexibler Greif- und Ablageprozess mit Niederdruckflächengreifer entwickelt. Dazu wurden verschiedene Varianten prototypisch umgesetzt und im Versuch getestet. Ein Catenary-Greifer genannter, gebogener Niederdruckflächengreifer mit zwei getrennten Niederdruckkammern hat sich als insgesamt beste Alternative präsentiert.

Das Erreichen der Flexibilität für die Versiegelung wurde durch die Umorientierung der Zelle zu den verwendeten Heißsiegelbalken erreicht. Dazu wurden zunächst Vorversuche durchgeführt, die gezeigt haben, dass dies zu keinem relevanten Qualitätsverlust im Zellstapel führt. Anschließend wurden die einzelnen Komponenten des Moduls systematisch entwickelt und ausgewählt.

Aus der Aufgabenstellung, dem Raumkonzept sowie den Prozessentwicklungen wurden dann die Anforderungen an jedes Produktionsmodul definiert, welche die Grundlage für die konstruktive Ausarbeitung der Anlagentechnik bildeten.

Für die Module Stapeln und Verpacken wurden verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten in morphologischen Kästen betrachtet und bewertet. Anhand dieser Bewertung folgte die konstruktive Umsetzung der Module. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme wurden die Module hinsichtlich ihrer Anforderungen getestet. Alle Module erfüllen die an sie gestellten Anforderungen vollumfänglich.

Abschließend wurde die Gesamtanlage mit Materialfluss und den Produktionsmodulen Stapeln und Kontaktieren getestet, um den Gesamtablauf zu validieren. Das erfolgreiche Gelingen der flexiblen Assemblierung von Lithium-Ionen-Zellen mit Industrieroboter

als zentralem Handlungselement und flexiblen Prozessen, welche in Produktionsmodulen umgesetzt werden, bildet die Grundlage für die weitere Entwicklung der agilen Anlagentechnik im Kontext der Batteriezellproduktion.

Da die Flexibilität des Verpackmoduls im Hinblick auf zukünftige, vollformatflexible Produktionen nicht ausreicht, wurde ein vollflexibles, dynamisches Heißsiegelverfahren entwickelt. Dazu wurden zunächst Versuche an dem Verpackmodul mit Heißsiegelbalken durchgeführt, um die Produktionsgrößen Heißsiegeltemperatur und –zeit mit den Qualitätsgrößen Abziehfestigkeit und Dichtigkeit bzw. Leckrate zu korrelieren. In einem validierten Modell des Prozesses konnte damit die Korrelation der inneren Prozessgröße Temperatur in der Siegelfläche (bezogen auf die Schmelztemperatur des Werkstoffs) mit den Qualitätsgrößen hergestellt werden. Ein dynamisches Heißsiegelmodell wurde entwickelt und auf Plausibilität geprüft, eine Validierung anhand von Versuchen konnte im Rahmen der Arbeit aufgrund von Lieferverzögerungen im Zusammenhang mit der Corona-Pandemie nicht erfolgen. Anhand der Korrelation der Siegelflächentemperatur mit den Qualitätsgrößen können nach erfolgter Validierung die Produktionsgrößen Siegeltemperatur und –geschwindigkeit für den dynamischen Prozess bestimmt werden.

Die systematische Entwicklung, Bauteilauswahl und Konstruktion eines solchen dynamischen Verpackmoduls erfolgte ebenfalls. Der Anlagenaufbau sowie die Validierung der Anlage als Einzelmodul und im Gesamtanlagenkontext wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet und bilden die Grundlage für weitere Arbeiten.

6.2 Ausblick

In anschließenden Arbeiten können die in Kapitel 4.5 erläuterten Kritikpunkte aufgegriffen und eliminiert werden, indem die Anlagentechnik weiter entwickelt wird. Dadurch wird der Technologiereifegrad der neuartigen Anlage erhöht und eine Übernahme des Konzepts in industrielle Produktionsanlagen begünstigt.

Die Steigerung der Produktivität der Roboterzelle zur Zellaussammlung durch Optimierung der Handlungsschritte, Bahnplanung und Verfahrensgeschwindigkeiten bilden dabei den ersten Schritt zur weiteren Industrialisierung des hier vorgestellten Konzepts.

Die vollständige Validierung und Umsetzung des dynamischen Heißsiegels in Prozess und Anlage steht ebenfalls aus, dies ist ein weiterer Schritt zur Flexibilisierung der Zellproduktion in agilen Anlagen.

Mit dem Funktionsbeweis der Assemblieranlage wurde ein großer Schritt hin zur agilen Batteriezellproduktion getan, es steht jedoch der Beweis aus, dass die Elektrodenfertigung und die Zellaktivierung ebenfalls in Roboterzellen durch flexible Produktionsmodule abgedeckt werden können. Hier ist weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit nötig, welche im Rahmen der Projekte AgiloBat1 und AgiloBat2 derzeit am KIT stattfindet.

Die erfolgreiche Inbetriebnahme einer agilen Zellproduktion als Prototyp, bestehend aus mehreren Roboterzellen mit flexiblen Produktionsmodulen über die gesamte Prozesskette hinweg ist dabei das erklärte Ziel der AgiloBat-Projekte. Damit bildet diese Arbeit den ersten Schritt auf dem Weg zur Etablierung der agilen Anlagentechnik in der industriellen Zellproduktion. Eine Vielzahl prozesstechnischer, anlagen- und steuerungstechnischer Fragestellungen kann dabei im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten beantwortet werden.

Literaturverzeichnis

Normen und Richtlinien

(Technical Norm ASTM D1876-08(2015)e1)

Technical Norm ASTM D1876-08(2015)e1: Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test).

(VDI 1997)

VDI (1997): Konstruktionsmethodik Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. VDI.

Handbücher, Whitepaper, Datenblätter

(Abbot 2012)

Abbot, Steven (2012): User's Manual for the Heat Seal Calculator - Jaws. Online verfügbar unter https://www.stevenabbott.co.uk/abbottapps/HSC-J/HSCJ_Help.html, zuletzt geprüft am 10.06.2024.

(Dai Nippon Printing Co., Ltd. 2012)

Dai Nippon Printing Co., Ltd. (2012): Datenblatt D-EL408PH(3).

(Herrmann Ultraschall GmbH 2018)

Herrmann Ultraschall GmbH (2018): Ultraschall Schweißtechnologie. Grundlagen Packstoffe. Hg. v. Herrmann Ultraschall GmbH. Herrmann Ultraschall GmbH. Online verfügbar unter https://www.herrmannultraschall.com/de/schweissen-mit-ultraschall/schweissen-von-verpackungen/ultraschallsiegeln?tx_avsite_protecteddownload%5Baction%5D=protectedDownload&tx_avsite_protecteddownload%5Bcontroller%5D=Download&tx_avsite_protecteddownload%5Bdownload-file%5D=74&type=1619702077&cHash=6e958ed62d2ce2ad2129fe95d92a6b26 zuletzt geprüft am 28.01.2024.

(Inficon 2018)

Inficon (2018): E-Mobilität: Die Bedeutung der Dichtheitsprüfung. Ein Inficon Whitepaper.

(Leister Technologies AG o.J.)

Leister Technologies AG (o.J.): Heißluftgebläse. Online verfügbar unter <https://www.leister.com/de/Heat-Guns>, zuletzt geprüft am 10.06.2024.

(Rottländer et al. 2016)

Rottländer, Hans; Umrath, Walter; Voss, Gerhard (2016): Fundamentals of Leak Detection.

(Watttron GmbH o.J.)

Watttron GmbH (o.J.): cera2heat: Die nachhaltigste Art der Thermoverformung. Online verfügbar unter <https://watttron.de/thermoformen/>, zuletzt geprüft am 10.06.2024.

Angeleitete wissenschaftliche Arbeiten

(A_Fröhlich 2019)

Fröhlich, Caroline (2019): Erarbeitung eines Raumkonzepts und Betrachtung des Materialflusses einer Roboterzelle zur flexiblen Produktion von Li-Ionen-Pouch-Zellen. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

(A_Vogt 2019)

Vogt, Marcel (2019): Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines autonomen Fertigungsmoduls zur Einzelblattstapelbildung in der flexiblen Produktion von Li-Ionen-Zellen. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie

(A_Krey 2020)

Krey, Selina (2020): Fertigstellung und Inbetriebnahme neuartiger Anlagenmodule zur flexiblen Produktion von Li-Ionen-Zellen. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

(A_Mühlenkamp 2021)

Mühlenkamp, Joshua (2021): Entwicklung und Konstruktion einer Handlingsanlage zur flexiblen Versiegelung von Lithium-Ionen-Pouch-Zellen. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

(A_Palendran 2022)

Palendran, Pratheepan (2022): Integration eines Roboters in die dynamische Versiegelung von Li-Ionen-Pouch-Zellen. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

(Ansari et al. 2018)

Ansari, R.; Rouhi, S.; Ahmadi, M. (2018): On the thermal conductivity of carbon nanotube/polypropylene nanocomposites by finite element method. In: *Journal of Computational Applied Mechanics* 49 (1), S. 70–85. University of Tehran, Teheran.

(Bauer 1972)

Bauer, Richard (1972): Lithium vom Standpunkt der Elektrochemie. In: *Chemie Ingenieur Technik* 44 (4), S. 147–151. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim. DOI: 10.1002/cite.330440403.

(Baumeister und Fleischer 2014)

Baumeister, M.; Fleischer, J. (2014): Integrated cut and place module for high productive manufacturing of lithium-ion cells. In: *CIRP Annals* 63 (1), S. 5–8. Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.063.

(Baumeister 2017)

Baumeister, Manuel (2017): Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion. In: *Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik* (205), S. 1–188. Shaker Verlag GmbH, Herzogenrath.

(Bold und Fleischer 2018)

Bold, Benjamin; Fleischer, Jürgen (2018): Kalandrieren von Elektroden für Li-Ionen-Batterien. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (9), S. 571–575. de Gruyter Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.3139/104.111968.

(Chen und Thielen 2004)

Chen, Jie-Wei; Thielen, Carsten (2004): Globo-Welding – Ein innovatives Konzept für das 3D-Laserfügen von Thermoplasten im Durchstrahlverfahren. In: *Lasertechnik Journal* 1 (2), S. 35–38. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim. DOI: 10.1002/latj.200790013.

(David et al. 2014)

David, Lamuel; Asok, Deepu; Singh, Gurpreet (2014): Synthesis and extreme rate capability of Si-Al-C-N functionalized carbon nanotube spray-on coatings as Li-ion battery electrode. In: *ACS applied materials & interfaces* 6 (18), S. 16056–16064. ACS Verlag, Washington, D.C. DOI: 10.1021/am5052729.

(Dorrman et al. 2021)

Dorrmann, Lydia; Sann-Ferro, Kerstin; Heining, Patrick; Mähliß, Jochen (2021): Kompendium: Li-Ionen-Batterien. VDE Verlag GmbH, Berlin.

(Fröhlich et al. 2018)

Fröhlich, Arian; Leithoff, Ruben; Boeselager, Christina von; Dröder, Klaus; Dietrich, Franz (2018): Investigation of particulate emissions during handling of electrodes in lithium-ion battery assembly. In: Procedia CIRP 78, S. 341–346. Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.322.

(Gandert et al. 2024)

Gandert, Julia C., Mühlfort, Raphael, Müller-Welt, Philip, Schall, Daniel, Schmidt, Adrian, Schuhmann, Sebastian, Seegert, Philipp, Weber, Niklas, Zeng, Yunying, Wetzel, Thomas, Paarmann, Sabine (2024): Methodology for the Holistic Design of Format-Flexible Lithium-Ion Battery Systems. In: International Journal of Energy Research 2024, S.1-17. Science And Education Publishing Co. Ltd., Newark. DOI: 10.1155/2024/2125023.

(Gerstin 2020)

Gerstin, Jesse (2020): The case for designing a circular battery. In: GreenBiz, 05.03.2020. Online verfügbar unter <https://www.greenbiz.com/article/case-designing-circular-battery>, zuletzt geprüft am 12.06.2024.

(Grabmann et al. 2022)

Grabmann, Sophie; Kriegler, Johannes; Harst, Felix; Günter, Florian J.; Zaeh, Michael F. (2022): Laser welding of current collector foil stacks in battery production—mechanical properties of joints welded with a green high-power disk laser. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology 118 (7-8), S. 2571–2586. Springer-Verlag GmbH, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/s00170-021-07839-0.

(Grebowicz et al. 1984)

Grebowicz, Janusz; Lau, S.-F.; Wunderlich, Bernhard (1984): The thermal properties of polypropylene. In: Journal of polymer science: Polymer symposia 71 (1), S. 19–37. Wiley Blackwell-STM, Hoboken. DOI: 10.1002/polc.5070710106.

(Guo und Fan 2016)

Guo, Zhansheng; Fan, Yang (2016): Heat seal properties of polymer–aluminum–polymer composite films for application in pouch lithium-ion battery. In: RSC Advances 6 (11), S. 8971–8979. RSC, London.
DOI: 10.1039/C5RA27097A.

(Haag 2020)

Haag, Sebastian (2020): Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen. In: Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik (237), S. 1-193. Shaker Verlag GmbH, Herzogenrath.

(Haarmann et al. 2021)

Haarmann, Matthias; Grießl, Desiree; Kwade, Arno (2021): Continuous Processing of Cathode Slurry by Extrusion for Lithium-Ion Batteries. In: Energy Technology 9 (10), S. 1-14. Wiley Blackwell-STM, Hoboken.
DOI: 10.1002/ente.202100250.

(Hawley et al. 2019)

Hawley, W. Blake; Li, Jianlin (2019): Electrode manufacturing for lithium-ion batteries—Analysis of current and next generation processing. In: Journal of Energy Storage 25, S. 100862-100878. Elsevier Ltd., Amsterdam.
DOI: 10.1016/j.est.2019.100862.

(Heimes et al. 2023)

Heimes, Heiner; Kampker, Achim; Wennemar, Sarah; Plocher, Lorenz; Bockey, Gerrit; Michaelis, Sarah; Schütrumpf, Jörg (2023): Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle. 4. Auflage. Eigendruck PEM der RWTH Aachen & VDMA Verlag, Aachen & Frankfurt am Main.

(Hishinuma 2009)

Hishinuma, Kazuo (2009): Heat sealing technology and engineering for packaging. Principles and applications. 3. Auflage. DEStech Publications, Lancaster.

(Hopp et al. 2005)

Hopp, Wallace J.; Iravani, Seyed M. R.; Shou, Biying (2005): Serial Agile Production Systems with Automation. In: Operations Research 53 (5), S. 852–866. INFORMS, Catonsville. DOI: 10.1287/opre.1050.0226.

(Jang und Ahn 2017)

Jang, Jun Hwan; Ahn, Sang Ho (2017): Numerical and experimental analysis of heat sealing of multi-layered laminate films used in lithium polymer battery packaging. In: *Journal of Plastic Film & Sheeting* 33 (2), S. 142–167. Sage Publications, Thousand Oaks. DOI: 10.1177/8756087916647092.

(Jiang und Li 2020)

Jiang, Pingyu; Li, Pulin (2020): Shared factory: A new production node for social manufacturing in the context of sharing economy. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 234 (1-2), S. 285–294. Sage Publications, Thousand Oaks. DOI: 10.1177/0954405419863220.

(Kampker 2014)

Kampker, Achim (2014): *Elektromobilproduktion*. 1. Auflage. Springer-Verlag GmbH, Berlin Heidelberg.

(Korthauer 2013)

Korthauer, Reiner (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. 1. Auflage. Springer-Verlag GmbH, Berlin Heidelberg.

(Kurfer et al 2012)

Kurfer, Jakob; Westermeier, Markus; Tammer, Christoph; Reinhart, Gunther (2012): Production of large-area lithium-ion cells – Preconditioning, cell stacking and quality assurance. In: *CIRP Annals* 61 (1), S. 1–4. Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.101.

(Kurzweil und Dietlmeier 2018)

Kurzweil, Peter; Dietlmeier, Otto K. (2018): *Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*. 1. Auflage. Springer-Verlag GmbH, Berlin, Heidelberg.

(Larsson et al. 2014)

Larsson, Fredrik; Andersson, Petra; Blomqvist, Per; Lorén, Anders; Mellander, Bengt-Erik (2014): Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. In: *Journal of Power Sources* 271, S. 414–420. Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.08.027.

(Liang et al. 2014)

Liang, Chang-Sheng; Lv, Zhong-Fei; Zhu, Ye-Ling; Xu, Shi-Ai (2014): Molybdate-based conversion treatment for improving the peeling strength between aluminum foil and polypropylene grafted with glycidyl methacrylate. In: *Surface and Coatings Technology* 249, S. 1–5. Elsevier Ltd., Amsterdam.
DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.03.038.

(Maiser et al. 2016)

Maiser, Eric; Michaelis, Sarah; Kampker, Achim; Heimes, Heiner; Lienemann, Christoph; Wessel, Saskia et al. (2016): *Roadmap Batterieproduktionsmittel 2030-Update 2016*. VDMA Verlag GmbH, Frankfurt am Main.

(Mayer und Fleischer 2021)

Mayer, Dominik; Fleischer, Jürgen (2021): Concept for modelling the influence of electrode corrugation after calendaring on stacking accuracy in battery cell production. In: *Procedia CIRP* 104, S. 744–749. Elsevier Ltd., Amsterdam.
DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.125.

(Mekonnen et al. 2016)

Mekonnen, Yemeserach; Sundararajan, Aditya; Sarwat, Arif I. (2016): A review of cathode and anode materials for lithium-ion batteries. In: *SoutheastCon 2016*: IEEE, Norfolk, VA, USA.

(Morales 2003)

Morales, Roberto Hernández (2003): *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. In: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft*, Nr. 149. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.

(Mühlbeier et al. 2021)

Mühlbeier, Edgar; Oexle, Florian; Gönzheimer, Philipp; Fleischer, Jürgen (2021): Wertstromkinematik – Produktionssysteme neu gedacht. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (11), S. 847–851. de Gruyter Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.1515/zwf-2021-0179.

(Müller-Welt et al. 2023)

Philip Müller-Welt, Katharina Bause, Albert Albers (2023): Battery System Optimization Using Format Flexible Pouch Cells – Literature Review and Research Methodology. In: Procedia CIRP 119, S. 1078-1083. Elsevier Ltd., Amsterdam. ISSN 2212-8271

(Pfeiffer 2019)

Pfeiffer, Ramona Angela (2019): Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen. In: Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik (228), S. 1–205. Shaker Verlag GmbH, Herzogenrath.

(Plocher et al. 2023)

Plocher, Lorenz; Heller, Marius; Ingendoh, Benedict; Turhan, Hasibe; Burgard, Matthias; Wennemar, Sarah et al. (2023): Mini-Environments In Lithium-Ion Battery Cell Production: A Survey On Current State, Challenges And Trends. publish-Ing., Hannover.

(Rauch 2013)

Rauch, Erwin (2013): Konzept eines wandlungsfähigen und modularen Produktionssystems für Franchising-Modelle. Universität Stuttgart, Stuttgart. DOI: 10.18419/opus4549

(Ruhland et al. 2021)

Ruhland, J.; Storz, T.; Kößler, F.; Ebel, A.; Sawodny, J.; Hillenbrand, J. et al. (2021): Development of a Parallel Product-Production Co-design for an Agile Battery Cell Production System. In: Proceedings of the Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference and the World Mass Customization & Personalization Conference, Aalborg, Denmark, S. 96–104. Springer-Verlag GmbH, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-030-90700-6_10.

(Schäfer et al. 2020)

Schäfer, Jens; Singer, Ramona; Hofmann, Janna; Fleischer, Jürgen (2020): Challenges and Solutions of Automated Disassembly and Condition-Based Remanufacturing of Lithium-Ion Battery Modules for a Circular Economy. In: Procedia Manufacturing 43, S. 614–619. Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.145.

(Schmitt et al. 2013)

Schmitt, Marcel; Baunach, Michael; Wengeler, Lukas; Peters, Katharina; Junges, Pascal; Scharfer, Philip; Schabel, Wilhelm (2013): Slot-die processing of lithiumion battery electrodes—Coating window characterization. In: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 68, S. 32–37. Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.cep.2012.10.011.

(Schröder et al 2016)

Schröder, Robert; Aydemir, Muhammed; Glodde, Arne; Seliger, Günther (2016): Design and Verification of an Innovative Handling System for Electrodes in Manufacturing Lithium-ion Battery Cells. In: *Procedia CIRP* 50, S. 641–646. Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.198.

(Sovacool 2019)

Sovacool, Benjamin K. (2019): The precarious political economy of cobalt: Balancing prosperity, poverty, and brutality in artisanal and industrial mining in the Democratic Republic of the Congo. In: *The Extractive Industries and Society* 6 (3), S. 915–939. Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.exis.2019.05.018.

(Spicher 2012)

Spicher, Ulrich (2012): Analyse der Effizienz zukünftiger Antriebssysteme für die individuelle Mobilität. In: *MTZ Motortechnische Zeitschrift* 73 (2), S. 98–105. Springer Vieweg, Wiesbaden. DOI: 10.1365/s35146-012-0242-4.

(Storz et al. 2021)

Storz, Tobias; Schild, Leonard; Vogt, Marcel; Hofmann, Janna; Fleischer, Jürgen; Lanza, Gisela (2021): Entwicklung eines flexiblen Produktionssystems für Batteriezellen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (4), S. 247–253. de Gruyter Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.1515/zwf-2021-0049.

(Wang et al. 2020)

Wang, Ming; Dang, Dingying; Meyer, Andrew; Arsenault, Renata; Cheng, Yang Tse (2020): Effects of the Mixing Sequence on Making Lithium Ion Battery Electrodes. In: *Journal of the Electrochemical Society* 167 (10). The Electrochemical Society, Pennington. DOI: 10.1149/1945-7111/ab95c6.

(Weinmann et al. 2020)

Weinmann, Hannes; Töpper, Hans-Christoph; Fleischer, Jürgen (2020): Coil2Stack: Ein innovatives Verfahren zur formatflexiblen Batteriezellherstellung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (4), S. 241–243. de Gruyter Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.3139/104.11219.

(Weydanz et al. 2018)

Weydanz, W. J.; Reisenweber, H.; Gottschalk, A.; Schulz, M.; Knoche, T.; Reinhart, G. et al. (2018): Visualization of electrolyte filling process and influence of vacuum during filling for hard case prismatic lithium ion cells by neutron imaging to optimize the production process. In: Journal of Power Sources 380, S. 126–134. Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.01.081.

(Wiendahl 2002)

Wiendahl, H-P (2002): Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. In: wt Werkstattstechnik online 92 (4), S. 122–127. VDI Fachmedien GmbH & Co. KG, Düsseldorf.

(Zeng et al. 2018)

Zeng, Fangxinyu; Chen, Jinyao; Yang, Feng; Kang, Jian; Cao, Ya; Xiang, Ming (2018): Effects of Polypropylene Orientation on Mechanical and Heat Seal Properties of Polymer-Aluminum-Polymer Composite Films for Pouch Lithium-Ion Batteries. In: Materials 11 (1), S. 1-17. MDPI, Basel. DOI: 10.3390/ma11010144.

(Zhen et al. 2021)

Zhen, Enmeng; Jiang, Jiangmin; Lv, Chen; Huang, Xiaowei; Xu, Hai; Dou, Hui; Zhang, Xiaogang (2021): Effects of binder content on low-cost solvent-free electrodes made by dry-spraying manufacturing for lithium-ion batteries. In: Journal of Power Sources 515, S. 230644- 230657, Elsevier Ltd., Amsterdam. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230644.

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1.1: Entwicklung des globalen Markts für Li-Ionen-Batterien in GWh von 2015 bis 2020 anhand von Daten und 2020-2025 als Prognose nach (Gerstin 2020)</i>	1
<i>Abbildung 1.2: Darstellung eines komplexen Bauraums und verschiedener Batteriezellen, welche zu einem passenden Batteriemodul kombiniert werden</i>	2
<i>Abbildung 2.1: Die elektrische Potentialdifferenz der Metalle gegenüber der Standardelektrode aus Wasserstoff nach (Schafmeister 1927, S. 414)</i>	6
<i>Abbildung 2.2: Die drei Bauarten von Lithium-Ionen-Zellen, jew. mit Gehäuse und zugehörigen Zellstapel</i>	9
<i>Abbildung 2.3: Verschiedene Zellformate von Pouch-Zellen als Modell und als reale Umsetzung mit zugehörigen Einzelblättern</i>	10
<i>Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau von Einzelblatt- und Z-Stapel bei der Stapelbildung</i>	15
<i>Abbildung 2.5: Prinzipdarstellung des Prozessschrittes "Notchen" in der Coil2Stack-Anlage</i>	17
<i>Abbildung 2.6: Coil2Stack Einzelanlage als Schema (oben) und Fotografie der Anlage (unten) nach (Weinmann et al. 2020)</i>	18
<i>Abbildung 2.7: Darstellung einer Pouch-Zelle im Schnitt mit Verpackung, Zellstapel und Ableitertabs</i>	20
<i>Abbildung 2.8: Grundlegendes Konzept der Verknüpfung redundanter Einzelanlagen zum agilen Produktionssystem</i>	24
<i>Abbildung 2.9: Beispielhafte, schematische Darstellung eines agilen Produktionssystems für Batteriezellen mit angedeuteter Skalierung durch Addition einer Roboterzelle</i>	27
<i>Abbildung 2.10: Schematischer Aufbau des Heißsiegelprozesses mit Siegelbalken bei einer Verbundfolie (oben) und qualitative Temperaturverteilung im Querschnitt der Verbundfolien (ohne Berücksichtigung der Heißsiegelbalken) während des Siegelprozesses (unten)</i>	29

<i>Abbildung 2.11: Temperaturkurven für verschiedene Siegeltemperaturen T_1 & T_2, wobei $T_1 > T_2$ gilt. Dargestellt sind Oberflächen- und Siegelflächentemperaturen für den jeweiligen Siegelvorgang. Die durchgezogenen Linien beschreiben die Temperaturkurve bei Abbruch des Heizvorgangs zu den jeweiligen Zeitpunkten t_1 & t_2, die gestrichelten Linien zeigen die Temperaturentwicklung bei andauerndem Siegelprozess. Schematische Darstellung, keine Realdaten</i>	30
<i>Abbildung 2.12: Peel Seal und Tear Seal als schematische Darstellung auf Molekülebene nach (Hishinuma 2009, S. 18) und Fotografien von Beispielen</i>	32
<i>Abbildung 2.13: Aufbau von Heiß- und Impulssiegelbalken im Querschnitt mit Stromquelle nach (Hishinuma 2009, S. 31, 33)</i>	33
<i>Abbildung 2.14: Globo-Welding Laserschweißverfahren der Fa. Leister, Darstellung aus (Leister Technologies AG o.J.a)</i>	34
<i>Abbildung 2.15: Schematische Darstellung einer Siegelnaht von Verbundfolien mit den zwei häufigsten Defekten. Flüssige Einschlüsse blau, feste schwarz und gasförmige weiß dargestellt</i>	36
<i>Abbildung 2.16: Schematischer Aufbau des T-Peel-Tests (oben) und beispielhafte Auswertungskurve (unten)</i>	37
<i>Abbildung 2.17: Beispielhafte Kurve der Zugfestigkeit über die Siegeltemperatur mit Maximum und abnehmender Abziehfestigkeit bei weiter steigender Siegeltemperatur</i>	37
<i>Abbildung 2.18: Skizze der Dichtigkeitsprüfung mit positiver Druckdifferenz (oben) und Lecksuche mit Schnüffelsonde (unten) mit Helium als Detektionsgas nach (Rottländer et al. 2016, S. 10)</i>	39
<i>Abbildung 3.1: Grundlegendes Vorgehen zur Zielerreichung in der vorliegenden Arbeit mit verwendeten Methoden (rechts diagonal)</i>	40
<i>Abbildung 3.2: Beispielhafte Anordnung und Verteilung der Flächen bei der funktionalen Flächenermittlung</i>	43
<i>Abbildung 3.3: Grundlegendes Vorgehen nach VDI 2222 (VDI 1997)</i>	45
<i>Abbildung 4.1: Breite und Länge kommerziell verwendeter Zellen im Pouch-Format</i>	47

<i>Abbildung 4.2: KIT-Zelle des Batterietechnikums (BaTec) am KIT</i>	48
<i>Abbildung 4.3: Verschiedene, nicht-rechteckige Pouch-Zellen, die in kommerziellen Produkten eingesetzt werden. Bildquellen siehe Fußnoten</i>	49
<i>Abbildung 4.4: Verschiedene Raumkonzepte mit Flächenangaben (Abstände der einzelnen Module sind in der Rechnung nicht berücksichtigt)</i>	56
<i>Abbildung 4.5: Maßstabsgetreues Modell des Raumkonzepts der Roboterzelle mit Robotermodell, angedeuteter Materialschleuse. Die Flächen der Produktionsmodule sind blau gekennzeichnet</i>	60
<i>Abbildung 4.6: Funktionsplan des Stapelvorgangs des Stapelmoduls nach VDI 2860</i>	61
<i>Abbildung 4.7: Vier Greifertypen als Prinzipskizze im Schnitt. a) Vakuumgreifer b) elektrostatischer Greifer c) Niederdruckflächengreifer und d) Bernoulli-Greifer</i>	62
<i>Abbildung 4.8: Ablagevorgang einer Elektrode in (Baumeister 2017) als Skizze</i>	63
<i>Abbildung 4.9: Ablauf der Ablage eines Separatorblattes in (Baumeister 2017) als Skizze</i>	64
<i>Abbildung 4.10: Funktionsplan des Stapelmoduls mit farblich blau hervorgehobenen Funktionen des flexiblen Einzelblattgreifers. Durchgezogener Rahmen: alleinige Funktion des Greifers, gestrichelter Rahmen: Funktion wird teilweise vom Greifer übernommen</i>	64
<i>Abbildung 4.11: Ablagevorgang eines Elektroden- oder Separatorblattes mit gebogenem Greifer</i>	67
<i>Abbildung 4.12: Schnitt der Greifervarianten V1, V2 und V3 aus (Storz et al. 2021)</i>	68
<i>Abbildung 4.13: Schnitte der Greifervarianten V3-1 und V3-2</i>	69
<i>Abbildung 4.14: Funktionsplan des Produktionsmoduls Kontaktieren</i>	72
<i>Abbildung 4.15: Aufbau des Drehversuchs (links) und präparierte Zelle mit Werkzeug (rechts)</i>	74

<i>Abbildung 4.16: Abstandsänderung der Ecken der ersten Lage (blau) und der dritten Lage (orange) zur Ecke der zweiten Lage durch Drehversuche (Storz et al. 2021, S. 252)</i>	75
<i>Abbildung 4.17: Funktionsplan des Verpackmoduls nach VDI 2860</i>	76
<i>Abbildung 4.18: Modell des Einzelblattmagazins</i>	79
<i>Abbildung 4.19: Fotografie des verwendeten Anodenmagazins in der Einbausituation</i>	80
<i>Abbildung 4.20: Finaler, im Stapelmodul verwendeter Catenary Greifer in verschiedenen Ansichten</i>	80
<i>Abbildung 4.21: Stapelablage in der Draufsicht (links) und Schrägansicht (rechts) im Anlagenkontext. Einige Bauteile wurden für die bessere Darstellung ausgeblendet</i>	82
<i>Abbildung 4.22: Stapelablage mit Greifer beim Ablegevorgang in der Schrägansicht (links) und Vorderansicht (rechts). Zu sehen ist eine abgelegte Elektrode mit aktivierten Niederhaltern</i>	83
<i>Abbildung 4.23: Stapelmodul als Modell (links) und Fotografie (rechts)</i>	84
<i>Abbildung 4.24: Darstellung der Verschiebung der Ecken aufeinander gestapelter Anodenblätter zur Ermittlung der Stapelgenauigkeit</i>	85
<i>Abbildung 4.25: Kontaktiermodul als Modell (links) und Fotografie (rechts)</i>	86
<i>Abbildung 4.26: Positionierprozess der Verpackungsfolie auf dem Zellstapel (oben) und Drehprozess der einseitig versiegelten Zelle (unten). Der obere Teil des Wekstückträgers ist in der unteren Darstellung ausgeblendet.</i>	89
<i>Abbildung 4.27: Anordnung der Heißsiegelbalken (HSB) des Verpackmoduls</i>	90
<i>Abbildung 4.28: Schematische Darstellung des Drehmoduls</i>	91
<i>Abbildung 4.29: Ergebnisse der Dichtigkeitstests (oben) und der Abziehtests (unten) zur Validierung des Verpackmoduls</i>	94
<i>Abbildung 4.30: Verpackmodul als Fotografie. Links im Bild die Heißsiegelanlage, rechts das Drehmodul</i>	95
<i>Abbildung 4.32: Greifer des zentralen Handlingroboters als Konstruktionsmodell</i>	96

<i>Abbildung 4.31: Fotografie der Roboterzelle als Innenansicht, Sicht auf Stapelmodul und Kontaktiermodul</i>	96
<i>Abbildung 4.33: Momentaufnahmen des Fertigungsprozesses in der Roboterzelle. Entnahme des Stapels (oben links), Roboter beim Kontaktieren (oben links) & Siegelprozess (unten)</i>	98
<i>Abbildung 4.34: Steuerungsarchitektur der Gesamtanlage</i>	98
<i>Abbildung 4.35: Webbasiertes Nutzerinterface der Gesamtanlage</i>	100
<i>Abbildung 4.36: Visuelle Analyse von Audioaufnahmen von Greifversuchen. Links: Referenz-Audioaufnahme von Ansaugung ohne Einzelblatt. Rechts: Exemplarische Audioaufnahme des Greifvorgangs eines rechteckigen Kathodeneinzelblatts</i>	102
<i>Abbildung 4.37: Ansaugzeiten in den finalen Greifversuchen für die verschiedenen Einzelblätter</i>	103
<i>Abbildung 4.38: Ergebnisse der Ableiter-Abschalttests für Anoden (oben) und Kathoden (unten) aus (A_Krey, 2020)</i>	105
<i>Abbildung 5.1: Vorgehen zur Entwicklung des flexiblen Siegelprozesses. Hellblau markierte Teilschritte sind nicht Teil der vorliegenden Arbeit</i>	112
<i>Abbildung 5.2: Aufbau der verwendeten Pouchfolie nach Datenblatt (Dai Nippon Printing Co., Ltd., 2012)</i>	113
<i>Abbildung 5.3: Aufbau des statischen Siegelmodells mit Heißsiegelbalken</i>	113
<i>Abbildung 5.4: Messspitze des verwendeten Thermoelements im Vergleich zu einem handelsüblichen Streichholz</i>	114
<i>Abbildung 5.5: Verlauf der Temperatur in der Siegelfläche aus Messung und Simulation</i>	115
<i>Abbildung 5.6: Leckrate (links) und Abziehfestigkeit (rechts) der Siegelproben bezogen auf die errechnete Prozessgröße PT</i>	115
<i>Abbildung 5.7: Prinzipskizze des Aufbaus zur Kontaktflächenermittlung</i>	117
<i>Abbildung 5.8: Aufbau des dynamischen Heißsiegelmodells</i>	117
<i>Abbildung 5.9: Oberflächentemperatur im dynamischen Heißsiegelmodell zu drei verschiedenen Zeitpunkten</i>	118

<i>Abbildung 5.10: Siegelwerkzeug als Gesamtansichten (oben) und Schnittansicht durch die Siegelrollen (unten)</i>	119
<i>Abbildung 5.11: Reglerstrecke der Heizung</i>	120
<i>Abbildung 5.12: Verfahren zur Ermittlung von $s\varphi$ und $\alpha(\varphi)$ durch iteratives Drehen der Kontur nach (A_Palendran 2022)</i>	121
<i>Abbildung 5.13: Stapelablage mit Dreheinheit und umpositionierbaren Sauggreifern</i>	122
<i>Abbildung 5.14: Zellstapelfixierung des Verpackmoduls mit Dreheinheiten</i>	123
<i>Abbildung 5.15: Konstruktionsmodell des flexiblen Verpackmoduls</i>	126

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2.1: Verschiedene Lochgrößen mit korrespondierenden Leckraten und Folgen für die Batteriezelle bei Pouch-Zellen nach (Inficon 2018, S. 16).</i>	39
<i>Tabelle 4.1: Übersicht über die Anforderungen, welche für die Produktionsmodule und Prozesse definiert wurden</i>	53
<i>Tabelle 4.2: Übersicht über die Abmaße der Produktionsmodule und den zugrundeliegenden Halbzeugen</i>	54
<i>Tabelle 4.3: Der experimentellen Flächenbedarfsermittlung zur Ermittlung der Gesamtfläche und der Konfiguration der Anlage zugrunde liegende Flächenangaben</i>	56
<i>Tabelle 4.4: Bewertung der betrachteten Materialtransportsysteme im Kontext der Produktion in einer Fertigungszelle</i>	58
<i>Tabelle 4.5: Lösungsmöglichkeiten zur Funktion „Sichere und flexible Aufnahme von Einzelblättern“ nach (A_Vogt 2019)</i>	66
<i>Tabelle 4.6: Lösungsansätze zur Funktion „Fixierung des Zellstapels bei der Blattablage durch Greifer ohne Kollision mit den Niederhaltern“, nach (A_Vogt 2019)</i>	67
<i>Tabelle 4.7: Ansaugzeiten für Separator- und Anodeneinzelblätter der verschiedenen Greifervarianten bei variablem Ansaugvolumenstrom. X entspricht keiner Ansaugung, nach (Storz et al. 2021)</i>	69
<i>Tabelle 4.8: Vergleich der Prozessalternativen zum Kontaktieren der Zellen</i>	71
<i>Tabelle 4.9: Morphologischer Kasten des Stapelmoduls</i>	78
<i>Tabelle 4.10: Bewertung der Umsetzungsalternativen der Funktion „Einzelblatt transportieren“</i>	81
<i>Tabelle 4.11: Morphologischer Kasten des Verpackmoduls</i>	87
<i>Tabelle 4.12: Übersicht über die Bewertung der Produktionsmodule</i>	107
<i>Tabelle 5.1: Bewertung der dynamischen Siegelverfahren</i>	109
<i>Tabelle 5.2: Ergebnisse der Druckversuche zur Kontaktflächenermittlung der Heißsiegelrollen</i>	116

<i>Tabelle 5.3: Bewertung der Alternativen zur Umsetzung der Funktion "Positionieren des Siegelwerkzeugs"</i>	124
<i>Tabelle A.1: Übersicht über die Kontaktversuche zur Parameterermittlung nach (A_Krey 2020). SZ: Schweißzeit, RPN: Referenzpunktnullung, A: Amplitude, SK: Schweißkraft, AK: Anfahrkraft, TK: Triggerkraft</i>	IX
<i>Tabelle A.2: Verwendete Stoffgrößen für die Wärmeflussmodellierung in COMSOL</i>	X

Anhang

Tabelle A.1: Übersicht über die Kontaktversuche zur Parameterermittlung nach (A_Krey 2020). SZ: Schweißzeit, RPN: Referenzpunktnullung, A: Amplitude, SK: Schweißkraft, AK: Anfahrkraft, TK: Triggerkraft

Material	Betriebsmodus		Parameter				#, Ergebnis
	SZ [s]	RPN [mm]	A [μm]	SK [N]	AK [N]	TK [N]	
Anode							
Cu		0,2	31,2	3000	1000	3000	Fehler
Cu	0,7		31,2	3000	1000	3000	Fehler
Cu		0,33	27	2000	1000	1000	1, gut
Cu		0,33	27	2150	1000	1000	2, gut
Cu		0,33	27	2100	1000	1000	3, gut
Cu		0,33	27	1900	1000	1000	Fehler
Cu		0,33	27	2200	1000	1000	4, gut
Cu		0,33	27	2250	1000	1000	5, gut
Cu		0,33	27	2300	1000	1000	6, gut
Cu		0,33	27	2200	1000	1500	Fehler
Cu	0,6		27	2200	1000	1000	Fehler
Cu	0,8		27	2200	1000	1000	Fehler
Kathode							
Al	0,25		23	2000	1000	1700	1, gut
Al	0,3		23	2000	1000	1700	2, gut
Al	0,25		23	2000	1000	1500	3, gut
Al	0,2		23	2000	1000	12000	4, gut
Al		0,25	23	2000	1000	1000	5, gut
Al	0,2		23	1800	1000	1000	6, gut
Al	0,2		23	1600	1000	1000	7, gut
Al	0,15		23	1600	1000	1000	8, gut

Tabelle A.2: Verwendete Stoffgrößen für die Wärmeflussmodellierung in COMSOL

Größe	Wert		Quelle
Polyamid			
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	0,26 (const.)		COMSOL
Wärmekapazität [J/(kg*K)]	1700 (const.)		COMSOL
Dichte [kg/m ³]	1150 (const.)		COMSOL
Aluminium			
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	237 (const.)		COMSOL
Wärmekapazität [J/(kg*K)]	904 (const.)		COMSOL
Dichte [kg/m ³]	2700 (const.)		COMSOL
Polypropylen			
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	Temp.	Wert	(Ansari et al. 2018, S. 72)
	0°C	0,24	
	24°C	0,25	
	50°C	0,25	
	75°C	0,25	
	100°C	0,25	
	125°C	0,25	
	150°C	0,20	
	175°C	0,20	
200°C	0,20		
Wärmekapazität [J/(kg*K)]	273,15 K	237,70	(Grebowicz et al. 1984, S. 30f)
	280 K	240,61	
	290 K	244,87	
	298,15 K	248,36	
	300 K	249,13	
	310 K	253,41	
	320 K	257,67	
	330 K	261,93	
	340 K	266,19	
	350 K	270,47	
	360 K	274,73	
	370 K	273,35	
	380 K	283,42	
	390 K	287,65	
	400 K	291,88	
	410 K	296,11	
	420 K	300,34	
430 K	304,57		
440 K	308,80		
450 K	313,03		
460 K	317,54		

	470 K	321,77	
	480 K	326,00	
	490 K	330,23	
	500 K	334,46	
Dichte [kg/m ³]	930		COMSOL

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 Leitechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

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

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 Linnenbueger

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

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

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

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

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

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

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

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

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

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

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

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

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

Band 84

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

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

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

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

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

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

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk 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 Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

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

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

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

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

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

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

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

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

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

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

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

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

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

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

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

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

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

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

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

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

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

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

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

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

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

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

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

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

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

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

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

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für 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 adaptronischen Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

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

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

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

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

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

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-effizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicher-
heit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme
Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz

Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken

Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

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

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

**Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry**

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

**Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine
Verfahrenkombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung**

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

**Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur
Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen**

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

**Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an
metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen**

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

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

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

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

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken
Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

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

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

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

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhaut

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwältzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

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

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

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

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

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

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

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

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

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

