

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

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der KIT-Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

eingereichte

Dissertation

von

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]
