

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

Eduard Gerlitz

**Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen
in Lithium-Ionen-Batteriemodulen**

Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen
Demontage von Traktionsbatterien

Band 298

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

Eduard Gerlitz, M.Sc.

Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen in Lithium-Ionen-Batteriemodulen

Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen
Demontage von Traktionsbatterien

Band 298

Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen in Lithium-Ionen-Batteriemodulen

Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen Demontage von
Traktionsbatterien

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

Eduard Gerlitz, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2025

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2025

Copyright Shaker Verlag 2025

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

Printed in Germany.

Print-ISBN	978-3-8191-0185-4
PDF-ISBN	978-3-8191-0261-5
ISSN	2944-6430
eISSN	2944-6449
https://doi.org/10.2370/9783819102615	

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, nachhaltiger und wirtschaftlicher Technologien stellt den entscheidenden Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen dar. 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 mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung von Produktionssystemen und -netzwerken. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik im Rahmen des Verbundprojektes DeMoBat (Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren zur Sicherung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe für die E-Mobilität). Ein großer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Fleischer, der mir diese Dissertation ermöglicht und mich stets positiv begleitet hat. Ein weiterer Dank gilt meinen engen Kolleginnen und Kollegen in der MAP-Gruppe, die mich in vielfältiger Weise unterstützt und gefördert haben. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen ehemaligen Studenten Tim Auer, Florian Biller, David Botzem, Steffen Chow, Louis Enslin, Marvin Greifenstein, Matthias Kagon, Daniel Littau, Marius Richter und Jan Zöller, die einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Für das ausführliche Korrekturlesen danke ich Dominik Goes, Sebastian Henschel und Jonas Hillenbrand. Mein Dank gilt auch Janna Hoffmann und Jens Schäfer, die das Projekt DeMoBat erst möglich gemacht haben. André Keller sowie David Bitterolf sei für die technische Unterstützung gedankt. Zu guter Letzt möchte ich einen herzlichen Dank an meine Eltern sowie an meine Lebensgefährtin Olja aussprechen, die mich vor allem in den schwierigsten Zeiten ermutigt und unterstützt haben und immer für mich da waren.

Wer nach den Sternen greift, hat sich damit abgefunden, seine irdische Heimat verloren zu haben. (Zitat: Tilly Boesche-Zacharow)

Zürich, im Juli 2025

Eduard Gerlitz

Kurzfassung

Die Demontage von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien im Sinne des effizienten Recyclings und Remanufacturings kann nur mit Anlagentechnologien mit einem möglichst hohen Automatisierungsgrad erfolgen. Der Variantenreichtum der Traktionsbatterien setzt hingegen eine flexible Demontagelösung voraus. Die vorliegende Dissertation soll einen Beitrag für eine flexible und automatisierte Demontage dieser Batterien leisten. Im Fokus steht das flexible Trennen der Zellkontaktierungen an verformungsbehafteten Batteriemodulen mit prismatischen Zellen. Das damit verbundene Spannungsfeld, bestehend aus Gefahren durch Lithium-Ionen-Batteriezellen in Kombination mit (teil)zerstörenden Trennverfahren, Variantenvielfalt sowie geometrische Verformungen, wird in der Arbeit thematisiert.

Das Ergebnis der Arbeit stellt eine digitale Prozesskette dar, welche, ausgehend von einer CAD-Datei sowie 3D-Kameraaufnahmen, ohne Benutzerinteraktionen einen Steuerungscode für das automatisierte Trennen der Zellkontaktierungen durch einen Fräsprozess in einer gegebenen flexiblen Demontageanlage generiert.

Zunächst wurden in der Anforderungsanalyse das Produkt und das Trennproblem näher betrachtet und Randbedingungen definiert. Dies stellt die Grundlage für die Anforderungsdefinition an das Demontagesystem inklusive der Teilsysteme dar. Weiterhin wurde für die kamerabasierte Verformungserfassung eine Machine Vision Pipeline erarbeitet und erfolgreich an zwei verschiedenen Batteriemodulen erprobt. Zudem konnte der Fräsprozess durch die Wahl eines passenden Fräswerkzeugs sowie eines prozesssicheren Parameterfensters qualifiziert werden. Die Wechselbeziehung zwischen Prozess und Produkt sowie Prozess und eingesetzter Kinematik (6-Achs-Knickarmroboter) wurde erfolgreich abgesichert. Hierbei konnten keine kritischen Interaktionen festgestellt werden. Für eine aufwandsarme Anlagenprogrammierung bei neuen Produktvarianten wurde ein Ansatz erarbeitet, der automatisiert aus CAD-Daten Stützstellen für Fräsbahnen extrahieren kann. Auf Basis der Stützstellen und der ermittelten Prozessparameter kann anschließend eine optimierte Trajektorienplanung und Steuerungscodegenerierung erfolgen. Die Validierungsversuche konnten die Funktionsfähigkeit der gesamten digitalen Prozesskette, die Kompensation geometrischer Verformungen, die Prozesssicherheit sowie die Produktflexibilität nachweisen. Eingesetzte Optimierungsverfahren konnten die Gesamtprozessdauer reduzieren.

Abstract

The disassembly of lithium-ion traction batteries for the purposes of efficient recycling and remanufacturing can only be carried out using system technologies with the highest possible degree of automation. However, the wide variety of traction batteries requires a flexible disassembly solution. This dissertation is supposed to contribute to a flexible and automated disassembly of these batteries. The focus is the flexible cutting of the cell contacting on battery modules with prismatic cells that are affected by deformation. This work addresses the complex field of tension arising from the hazards of lithium-ion battery cells in combination with (partially) destructive cutting processes, the wide range of variants, and geometric deformations.

The result of the work is a digital process chain that, starting from a CAD file and 3D camera captures, generates a control code for the automated cutting of the cell contacting by a milling process in a given flexible disassembly system without user interaction.

First, the product and the cutting problem were analyzed in more detail and boundary conditions were defined. This forms the basis for defining the requirements for the disassembly system, including the subsystems. Furthermore, a machine vision pipeline was designed for camera-based deformation measurement and successfully tested on two different battery modules. In addition, the milling process was qualified by selecting a suitable milling tool and a process-reliable parameter window. The interactions between the process and the product and between the process and the kinematics used (6-axis articulated robot) were successfully verified. No critical interactions were detected. An approach has been developed to automatically extract path points for milling paths from CAD data to enable low-effort system programming for new product variants. Optimized trajectory planning and control code generation can then be performed based on the path points and identified process parameters. The validation tests were able to demonstrate the functionality of the entire digital process chain, the compensation of geometric deformations, the process reliability and the product flexibility. The optimization methods used were able to reduce the overall process time.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	V
Formelzeichen	VIII
Kinematik	VIII
Prozess	X
Produkt	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Lithium-Ionen-Traktionsbatterien	5
2.1.1 Grundlagen zu Lithium-Ionen-Traktionsbatterien	5
2.1.2 EoL-Strategien bei Traktionsbatterien	9
2.1.3 Forschungsarbeiten zur Demontageprozessautomatisierung	12
2.1.4 Prozesskette und Herausforderungen bei der Moduldemontage	14
2.2 Trennverfahren	18
2.2.1 Eingegrenzte Übersicht von Trennverfahren	19
2.2.2 Forschungsarbeiten zu Trennverfahren	23
2.3 Demontagesystem und -planung	27
2.3.1 Aufbau eines flexiblen, automatisierten Demontagesystems	27
2.3.2 Demontageplanung	32
2.3.3 Forschungsarbeiten zur automatisierten Demontageplanung	33
2.4 Sensorbasierte Geometrieerfassung	36
2.4.1 3D-Vision-Systeme	36
2.4.2 Forschungsarbeiten zum kamerabasierten CAD-Abgleich	42
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	45
3.1 Problemstellung und Zielsetzung	45

3.2	Vorgehensweise	48
4	Anforderungsanalyse	50
4.1	Produktanalyse	50
4.1.1	Marktanalyse Zellen	50
4.1.2	Topologischer Aufbau eines Batteriemoduls	52
4.1.3	Analyse der Zellkontaktierung	54
4.1.4	Geometrische Verformung der Batteriezellen	56
4.1.5	Gefahrenanalyse und Risiken durch Lithium-Ionen-Zellen	59
4.2	Analyse des Trennproblems und Lösungsalternativen	62
4.2.1	Analyse des Trennproblems und Auswahl der Trennstrategien	62
4.2.2	Lösungsalternativen für Trennverfahren und Eingrenzung	63
4.2.3	Anwendung von Trennstrategie und -verfahren	66
4.3	Anforderungen an das Demontagesystem	67
4.4	Ausschnitt des Gesamtsystems zum Trennen der Zellkontaktierungen	68
5	Kamerabasierte Verformungserfassung	70
5.1	Kalibrierung	70
5.1.1	Kalibrierung des Drehtisch-Koordinatensystems	72
5.1.2	Kalibrierung des Roboterbasis-Koordinatensystems	74
5.2	Aufbau der Verarbeitungspipeline	76
5.2.1	Referenzmodellerzeugung	77
5.2.2	3D-Aufnahme	81
5.2.3	Registrierung und Punktlokalisierung	84
5.2.4	Transformation	87
5.3	Validierung der Verarbeitungspipeline	88
5.3.1	Versuchsaufbau und Validierungsmethodik	88
5.3.2	Ergebnisse und Optimierungspotenziale	91
6	Qualifizierung des Trennprozesses	93
6.1	Definition der Zerspanungsstrategie	93
6.1.1	Eingrenzung der Werkzeug- und Prozessparameter	94

6.1.2	Versuchsaufbau und -durchführung	99
6.1.3	Ermittlung des stabilen Parameterfensters für den Fräsprozess	103
6.2	Absicherung hinsichtlich kritischer, produktbezogener Größen	106
6.2.1	Methodik zur Messauswertung	108
6.2.2	Abschätzung der Schnitt- und Vorschubkraft	111
6.2.3	Abschätzung der kritischen Temperaturen	114
6.2.4	Abschätzung der kritischen Spanlänge	116
6.3	Kinematische Einschränkungen und Randbedingungen	119
6.3.1	Randbedingungen	119
6.3.2	Erreichbarkeitsanalyse	122
6.3.3	Analyse erreichbarer Werkzeugbahngeschwindigkeiten	124
6.3.4	Analyse der prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebung	130
7	CAD-basierte Demontageplanung	133
7.1	CAD-basierte Fräsbahnplanung	135
7.2	Trajektorienplanung und Generierung des Steuerungscode	141
7.3	Globale Optimierung der Gesamtprozesszeit	143
7.3.1	Definition Optimierungsproblem	143
7.3.2	Voroptimierung der Busbar-Reihenfolge und der Fräsrichtungen	144
7.3.3	Vergleich der Optimierungsverfahren	148
7.4	Gesamtsystemintegration	152
8	Validierung des flexiblen Trennens	156
8.1	Prüfstands Aufbau	156
8.2	Validierungsergebnisse	159
8.2.1	Kompensation geometrischer Verformungen	159
8.2.2	Prozesssicherheit und Produktflexibilität	163
8.2.3	Zeitersparnis durch globale Optimierung	168
8.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	170
9	Bewertung	171
9.1	Allgemeine Bewertung	171

9.2	Generalisierbarkeit und Übertragbarkeit	173
10	Zusammenfassung und Ausblick	176
10.1	Zusammenfassung	176
10.2	Ausblick	179
	Publikationsliste des Autors	XIII
	Literaturverzeichnis	XV
	Abbildungsverzeichnis	XXXVII
	Tabellenverzeichnis	XLIII
	Anhang	XLVI
10.1	Anlagen- und Roboterparameter	XLVI
10.2	Datenblatt COMAU NJ290-3.0	XLVII
10.3	Datenblatt ZIVID Two	XLVIII
10.4	Datenblatt PDS	L
10.5	Datenblatt Garant VHM-Fräser	LI
10.6	Datenblatt VARTA-Zelle	LII
10.7	Datenblatt CATL-Zelle	LIII

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
3R	Remanufacturing, Reuse und Recycling
AOLP	Automatisierte Offline-Programmierung
BCPD	Bayesian Coherent Point Drift
BEV	Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug
BMS	Batteriemanagementsystem
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CP	Continuous-path
CSG	Constructive Solid Geometry
CTP	Cell-to-Pack
CV	Computer Vision
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DDC	Disassembly Difficulty Calculators
DH	Denavit-Hartenberg
DLC	diamond-like-carbon
DS	Direkte Suchmethoden
DSP	Disassembly Sequence Planning (Demontagesequenzplanung)
EA	Evolutionäre Algorithmen
ECU	Elektronische Steuergeräte
EoL	End-of-Life (Lebensende)
FCV	Brennstoffzellenfahrzeug
FPFH	Fast Point Feature Histograms
GUI	Graphic User Interface (Benutzeroberfläche)
HF	Flusssäure

ICE	Verbrennungsmotor
ICP	Iterative Closest Point
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
KOS	Koordinatensystem
KSS	Kühlschmierstoffe
LCO	Lithium-Cobalt-Oxid
LFP	Lithiumeisenphosphat
Li_2Co_3	Lithiumcarbonat
Li_2SO_4	Lithiumsulfat
LiOH	Lithiumhydroxid
LiPF_6	Lithiumhexafluorophosphat
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
LNO	Lithium-Nickel-Oxid
LoA	Levels of Automation
M2Z	Batteriemodule zu -zelle
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide
NGV	Erdgasfahrzeug
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide
P2M	Batteriepack zu -modul
P2Z	Batteriepack zu -zelle
PHEV	Plug-in-Hybrid-Fahrzeug
PKD	Polykristalliner Diamant
PTP	Point-to-point
RANSAC	Random Sample Consensus
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SOH	State-of-Health
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
STL	Stereolithography

TCP	Tool-Center-Point (Werkzeugspitze)
TEASER	Truncated Least Squares Estimation And Semidefinite Relaxation
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TR	Thermal Runaway (thermisches Durchgehen)
VHM	Vollhartmetall
Z2E	Zelle zu Elektroden

Formelzeichen

Kinematik

Formelzeichen	Größe	Einheit
KOS_{CAM}	Kamera-Koordinatensystem	
KOS_{TT}	Drehtisch-Koordinatensystem	
KOS_{OBJ}	Werkstück-Koordinatensystem	
KOS_{ROB}	Roboterbasis-Koordinatensystem	
KOS_{EE}	Roboterflansch-Koordinatensystem	
KOS_{TCP}	Werkzeug-Koordinatensystem	
q	Gelenkkoordinaten	[rad] ⁶
\dot{q}	Achswinkelgeschwindigkeit in Gelenkkoordinaten	[rad/s] ⁶
q_{targ}	Zielwinkelstellung in Gelenkkoordinaten	[rad] ⁶
θ_{init}	Initiale Winkelstellung in Gelenkkoordinaten	[rad] ⁶
p	Weltkoordinaten	[m] ³ , [rad] ³
\dot{p}	TCP-Geschwindigkeit in Weltkoordinaten	[m/s] ³
p_{targ}	Zielposition in Weltkoordinaten	[m] ³
A_{targ}	Zielorientierungsmatrix	[rad] ³
p_{home}	Home-Position	[m] ³
C	Nachgiebigkeit	[mm/kN]
AT	Bahngenauigkeit	[mm]
AP	Posengenauigkeit	[mm]
M_{bbb}^{aaa}	Transformationsmatrix von KOS_{aaa} zu KOS_{bbb}	
T_{ccc}	Transformationsmatrix durch θ_{TT} -Drehung in KOS_{ccc}	
$T_{n-1}^n(\theta_n)$	Transformationsmatrix der einzelnen Roboterachs-Koordinatensysteme	
$J(q)$	Jacobi-Matrix von $M_{ROB}^{EE}(q)$	
θ_n	Winkelstellung der n-ten Roboterachse	[rad]
p_n^{ddd}	n-ter Punkt im KOS_{ddd}	[m] ³

θ_{TCP}	Spindelorientierung	[°]
θ_7, θ_{TT}	Drehtischwinkelstellung	[°]
c_o	Busbar-Reihenfolge	[-]
$c_{d,i}$	Fräsrichtung an i-ter Busbar	[-]
p_{access}	Prozentualer Anteil erreichbarer Punkte im betrachteten Untersuchungsvolumen	[%]
$v_{f,konst,max}$	Maximal erreichbare Konstant-Bahngeschwindigkeit	[mm/min]
$max(\Delta d)$	Maximale, prozesskraftbedingte Werkzeugbahnverschiebung	[mm]
p_1, p_2	Start- und Endpunkt der Fräsoperation	[mm]
p_0, p_3	Rückzugspunkte der Fräsoperation	[mm]
o_1	Offset-Eintauchabstand	[mm]
o_2	Offset-Eintauchtiefe	[mm]
o_3	Offset-Rückzugshöhe	[mm]
v_1, v_2, v_3, v_4	Eckpunkte des minimal umgebenden Schnittrechtecks an einer Busbar	[mm]
p_A, p_B	Start- bzw. Endpunkt des minimal umgebenden Schnittrechtecks an einer Busbar	[mm]
t_{all}	Gesamtprozesszeit	[s]
$t_n^{G0,PTP}$	Dauer einer G0-PTP-Bewegung	[s]
$t_n^{G0,CP}$	Dauer einer G0-CP-Bewegung	[s]
$t_n^{G1,CP}$	Dauer einer G1-CP-Bewegung	[s]
L_{boo}	Werkzeugbahn-Gesamtstrecke beim Bumerang-Muster	[mm]
L_{mea}	Werkzeugbahn-Gesamtstrecke beim Mäander-Muster	[mm]
S	Optimierungsperformance	[-]
t_{calc}	Optimierungslaufzeit	[s]

Prozess

Formelzeichen	Größe	Einheit
F_c	Schnittkraft	[N]
F'_c	Schnittkraft, normiert auf $b = 1 \text{ mm}$	[N/mm]
F_f	Vorschubkraft	[N]
F'_f	Vorschubkraft, normiert auf $b = 1 \text{ mm}$	[N/mm]
F_p	Passivkraft	[N]
a_p	Schnitttiefe	[mm]
d_w	Werkzeugdurchmesser	[mm]
f_z	Zahnvorschub	[mm/Zahn]
k_c	Spezifische Schnittkraft	[N/mm ²]
$k_{c1,1}$	Spezifische Schnittkraft bei $b = 1 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$	[N/mm ²]
k_f	Spezifische Vorschubkraft	[N/mm ²]
$k_{f1,1}$	Spezifische Vorschubkraft bei $b = 1 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$	[N/mm ²]
m_c	Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft	[-]
m_f	Anstiegswert der spezifischen Vorschubkraft	[-]
v_c	Schnittgeschwindigkeit	[m/min]
$v_{c,max}$	Maximale Schnittgeschwindigkeit	[m/min]
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]
$v_{f,max}$	Maximale Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]
h	Spanungsdicke	[mm]
h_{max}	Maximale Spanungsdicke	[mm]
b	Spanungsbreite	[mm]
n	Drehzahl	[1/min]
z	Zähnezahl bzw. Schneidenanzahl	[-]
α_n	Freiwinkel	[°]
β_n	Keilwinkel	[°]

γ_n	Spanwinkel	[°]
λ_s	Neigungswinkel (= Drallwinkel)	[°]
κ	Einstellwinkel	[°]
φ	Vorschubrichtungswinkel	[°]
\dot{Q}_{luft}	Wärmestrom durch Luft	[W]
\dot{Q}_{SP}	Wärmestrom durch Span	[W]
\dot{Q}_{WZ}	Wärmestrom durch Werkzeug	[W]
\dot{Q}_{WS}	Wärmestrom durch Werkstück	[W]
u_T	Temperatur-Messunsicherheit	[K]
K_v	Korrekturfaktor bzgl. Schnittgeschwindigkeit	[-]
K_{WV}	Korrekturfaktor bzgl. Werkzeugverschleiß	[-]

Produkt

Formelzeichen	Größe	Einheit
z_b	Zelldicke	[mm]
z_t	Zelltiefe	[mm]
z_h	Zellhöhe	[mm]
p_{t+}/p_{t-}	Zellpoltiefe+/-	[mm]
p_{b+}/p_{b-}	Zellpoldicke+/-	[mm]
p_h	Zellpolhöhe	[mm]
p_a	Zellpolabstand	[mm]
b_b	Busbar-Gesamtbreite	[mm]
b_l	Busbar-Gesamtlänge	[mm]
b_d	Busbar-Blechdicke	[mm]
b_{l1}	Busbar-Auflagenlänge	[mm]
b_{l2}	Busbar-Brückenlänge	[mm]
b_h	Busbar-Brückenwellenhöhe	[mm]
i_{busbar}	Fortlaufende Busbarnummer	[-]

m_b	Moduldicke	[mm]
m_t	Modultiefe	[mm]
$m_{h,min}, m_{h,max}$	Modulhöhe (minimal, maximal)	[mm]
$\Delta d_{i,krit}$	Kritische Dickenänderung einzelner Zelle	[mm]
$\Delta d_{akk,krit}$	Akkumulierte kritische Dickenänderung	[mm]
T_{max}	Grenztemperatur am Zellpol (Annahme)	[°C]
F_{max}	Maximal erlaubte Kraft am Zellpol (Annahme)	[N]
a_{krit}	Kritischer Abstand am Zellpol (Annahme)	[mm]
l_{krit}	Kritische Spanlänge	[mm]
$l_{krit,max}$	Maximale, kritische Spanlänge	[mm]
Q_{max}	Maximale Wärmemenge	[J]
ϵ_t	Tiefenabweichung	[mm]
$\epsilon_{t,max}$	Maximal erlaubte Tiefenabweichung	[mm]
ϵ_b	Bahnabweichung	[mm]
$\epsilon_{b,max}$	Maximal erlaubte Bahnabweichung	[mm]

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ein wachsendes Umweltbewusstsein sowie strengere Regularien führen zu einem Anstieg der Absatzzahlen von batterieelektrischen Fahrzeugen. Abbildung 1–1 veranschaulicht den raschen Zuwachs an neu zugelassenen Elektrofahrzeugen in den letzten Jahren. Laut (ZSW 2023) fand 2022 weltweit eine Neuzulassung von 10,8 Mio. Elektroautos (Batterieelektro- (BEV) sowie Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen (PHEV)) statt.

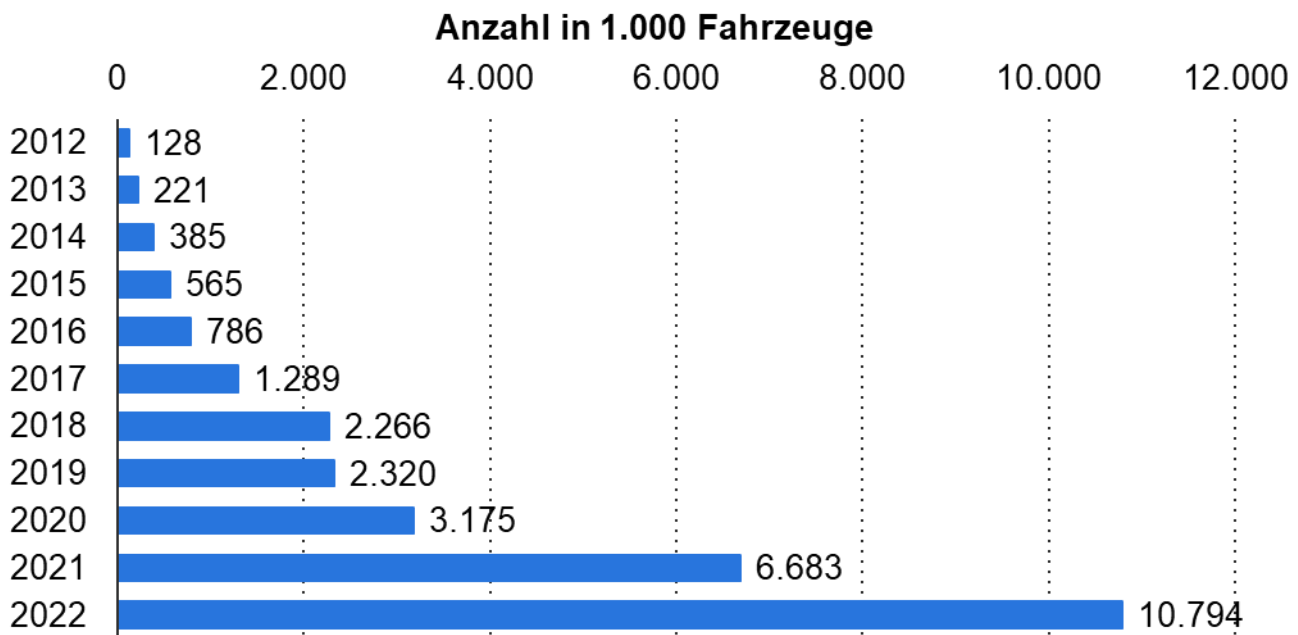


Abbildung 1–1: Anzahl an neu zugelassenen Elektroautos weltweit bis 2022 in Anlehnung an (ZSW 2023)

Nach Prognosen der (ABB Group 2021) werden bereits im Jahr 2036 mit 27,2 Mio. jährlich abgesetzten Einheiten batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV) den Markt überwiegen. Abbildung 1–2 illustriert die prognostizierten weltweiten Absatzzahlen bis 2040 von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebsarten.

Neben dem Traktionsmotor stellt die Traktionsbatterie eine essenzielle Komponente des elektrischen Antriebsstranges dar. Mit einem Kostenanteil von schätzungsweise 60 Prozent ist gemäß (Lensch-Franzen et al. 2020) die Traktionsbatterie der kostenintensivste Bestandteil im Antriebsstrang eines batteriebetriebenen Fahrzeugs. Der größte Anteil an den Gesamtkosten in einer Traktionsbatterie in einem BEV entfällt nach (BloombergNEF 2023) auf die Batteriezellen mit schätzungsweise 78 Prozent (Jahr 2023). Aktuell haben sich Lithium-Ionen-Batterien als geeigneter Energiespeicher in

Traktionsbatterien durchgesetzt. Diese werden grundlegend anhand des eingesetzten Kathodenmaterials unterschieden. Nach (Cluzel 2019) dominieren die Kathodenmaterialien NCA sowie NMC (insbesondere NMC622, NMC811 sowie NMC955) den aktuellen Markt und werden diesen weiterhin beherrschen. (Kampker et al. 2018; Kurzweil & Dietlmeier 2015)

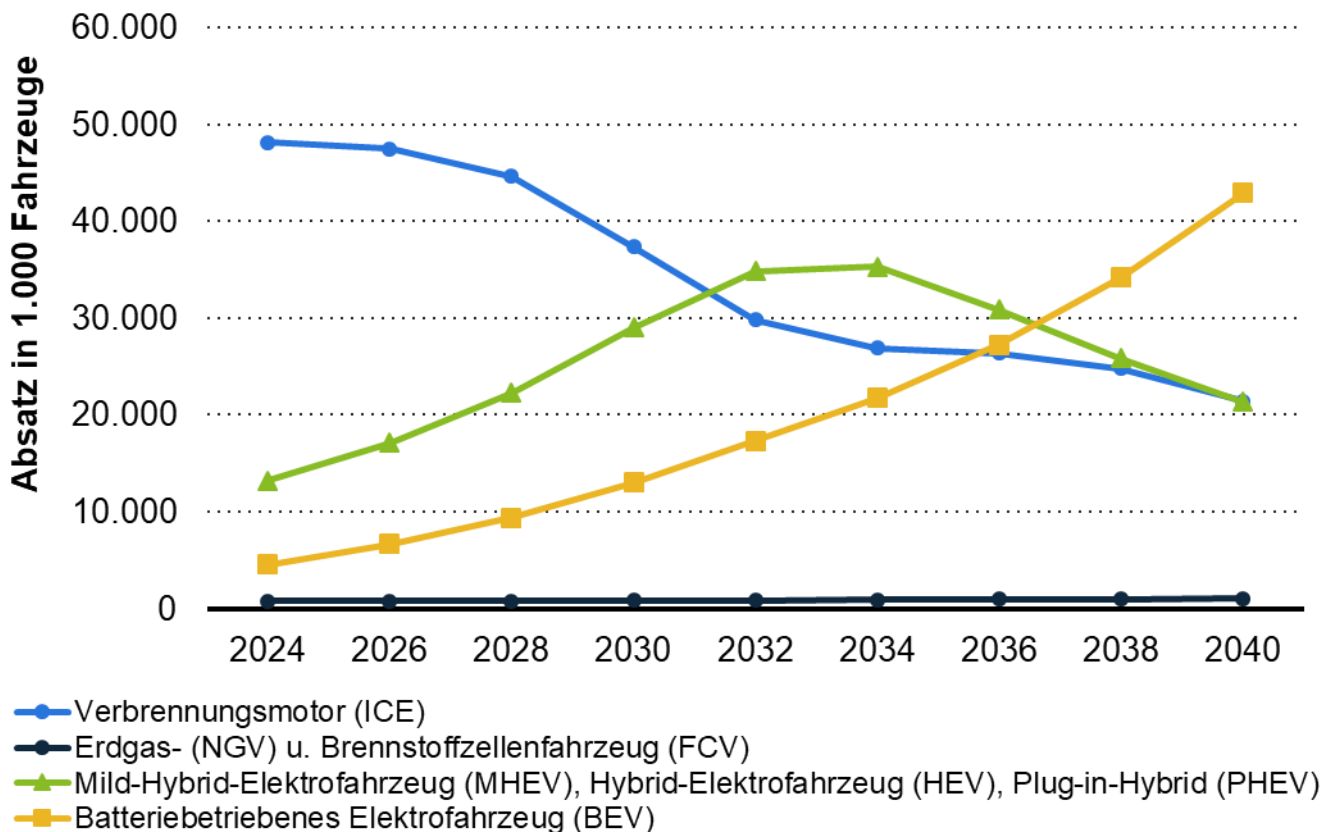


Abbildung 1–2: Prognose des jährlichen Absatzes von Personenkraftwagen weltweit nach Antrieb bis 2040 in Anlehnung an (ABB Group 2021)

Der starke Anstieg in der Produktion und die Nutzung der Traktionsbatterien führen zu einem zeitversetzten Anstieg an Rückläufern, welche das Lebensende (engl.: End-of-Life, kurz: EoL) überschritten haben. Die durchschnittliche Lebensdauer einer Traktionsbatterie wird auf zehn bis 15 Jahre geschätzt. Nach dem Lebensende ist im Sinne der Kreislaufwirtschaft die Wahl einer geeigneten Strategie wie **Reuse**, **Remanufacturing** sowie **Recycling** (3R) zu treffen. Die „Wiederinstandsetzung für die Wiedernutzung“ (engl.: **Remanufacturing**) sowie die „Umwidmung für die Weiternutzung“ (engl.: **Reuse**) sind dabei zu bevorzugen, da die Funktionsfähigkeit der einzelnen Batteriezellen noch erhalten bleibt. **Recycling** hingegen ermöglicht die Extraktion der enthaltenen wertvollen Rohstoffe, wie z. B. Kobalt, Nickel oder Kupfer. Das direkte Recycling gestattet sogar die direkte Extraktion der Anoden- bzw. Kathodenmaterialien aus den

Elektroden und den Wiedereinsatz in neuen Lithium-Ionen-Zellen mit minimalen kristallmorphologischen Veränderungen. Für die Umsetzung der 3R-Strategie ist die Demontage der Traktionsbatterien erforderlich. Insbesondere für das Remanufacturing sowie das direkte Recycling ist eine Zerlegung bis auf Zellebene unabdingbar. Derzeit erfolgt die Demontage von Traktionsbatterien bis auf Modulebene durch qualifiziertes Fachpersonal händisch. (Becker et al. 2019; Glöser-Chahoud et al. 2021; Harper et al. 2019; Schäfer et al. 2020)

Die erwarteten Losgrößen in den nächsten Jahren sowie die hohen Lohnkosten des qualifizierten Fachpersonals in einem Hochlohnstandort wie Deutschland erfordern jedoch eine wirtschaftliche Automatisierungslösung für die Demontage von Traktionsbatterien für die unterschiedlichen EoL-Strategien. Weiterhin sprechen die zahlreichen Gefahren, wie Explosion, Brand oder chemische Gefahrstoffe, welche laut (Kwade 2018) von Lithium-Ionen-Zellen ausgehen, für einen hohen Automatisierungsgrad der Demontage mit möglichst geringem Einsatz des Menschen. Im Kontrast dazu steht die hohe Variantenvielfalt der Traktionsbatterien auf Pack- und Modulebene (Gerlitz et al. 2021a; Zorn et al. 2022), welche flexible Anlagentechnik erfordert. Eine konventionelle Transferstraße (Perović 2009), welche auf eine Großserienfertigung von Produkten mit wenigen Varianten ausgelegt ist, stößt hierbei an ihre Grenzen.

Nachfolgend soll der Fokus auf der automatisierten Demontage von Batteriemodulen liegen. Dabei ergeben sich vier Herausforderungsfelder, die einzeln bzw. in Kombination adressiert werden müssen:

- (1) Variantenvielfalt der Lithium-Ionen-Batteriemodule (Gerlitz et al. 2021a)
- (2) Risiken und Gefahren aufgrund von Lithium-Ionen-Zellen (Kwade 2018)
- (3) Geometrische Verformungen der Lithium-Ionen-Zellen u. a. aufgrund Volumenänderung der Zellen (Kurzweil & Dietlmeier 2015; Sauerteig 2018)
- (4) Unlösbare Fügeverbindungen (Gerlitz et al. 2021a)

Auf die genannten Herausforderungen wird näher in Kapitel 2.1.4.2 eingegangen. Zur Ableitung der Anforderungen an die automatisierte Demontage müssen zunächst die produktspezifischen Randbedingungen durch die Lithium-Ionen-Traktionsbatterien beleuchtet werden. Basierend auf den vier Herausforderungen lassen sich drei zentrale Themengebiete identifizieren, die in Kapitel 2 näher betrachtet werden.

Jedes dieser Themengebiete führt zu einem spezifischen Forschungsdefizit:

- Trennverfahren (abgeleitet aus (2) und (4))
- (Flexibles) Demontagesystem und -planung (abgeleitet aus (1))
- Sensorbasierte Geometrieerfassung (abgeleitet aus (3))

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Automatisierung der flexiblen Demontage von Batteriemodulen. Der Fokus liegt hierbei auf dem aufwandsminimalen und flexiblen Trennen der Zellkontaktierungen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im anschließenden Kapitel 2 werden die relevanten Grundlagen wiedergegeben. Zugleich wird der Stand der Forschung und Technik beleuchtet, um das Forschungsdefizit aufzuzeigen. In Kapitel 3 wird die Problemstellung definiert und daraus die Zielsetzung abgeleitet. Weiterhin werden der eigene Ansatz und die damit verbundene Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung vorgestellt. Kapitel 4 gibt die Ergebnisse der Anforderungsanalyse wieder. Hierbei werden das Produkt sowie das Trennproblem analysiert, um die Anforderungen an das Demontagesystem zu definieren. Kapitel 5 behandelt die kamerabasierte Verformungserfassung zur Kompensation der produktseitigen Geometrievarianz. In diesem Kapitel wird zunächst auf die Kalibrierung des Gesamtsystems eingegangen. Weiterhin wird der Aufbau der entwickelten Verarbeitungspipeline vorgestellt, welche anschließend validiert wird. In Kapitel 6 wird der Trennprozess für das Trennen der Zellkontaktierungen qualifiziert. Zunächst wird die Zerspanungsstrategie definiert, welche hinsichtlich kritischer, produktbezogener Größen abgesichert wird. Im Anschluss werden kinematische Randbedingungen und Einschränkungen durch die eingesetzte Kinematik untersucht. Kapitel 7 behandelt die CAD-basierte Demontageplanung. Diese setzt sich aus einer Fräsbahn- und Trajektorienplanung zusammen, denen eine globale Optimierung folgt. Daraufhin wird näher auf die Gesamtsystemintegration eingegangen. Kapitel 8 gibt die Ergebnisse zur Validierung des flexiblen Trennens der Zellkontaktierung wieder. Zunächst wird auf den Prüfstands Aufbau Bezug genommen und danach werden die Validierungsergebnisse vorgestellt. In Kapitel 9 findet eine kritische Bewertung des erarbeiteten Ansatzes statt. Zudem wird die Generalisierbarkeit sowie Übertragbarkeit außerhalb des Gültigkeitsbereichs geprüft. Kapitel 10 fasst die vorliegende Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche Folgearbeiten.

2 Stand der Forschung und Technik

Nachfolgend werden relevante Grundlagen wiedergegeben sowie der Stand der Forschung und Technik aufgezeigt. Hieraus wird das Forschungsdefizit abgeleitet.

2.1 Lithium-Ionen-Traktionsbatterien

Im Folgenden wird auf relevante Grundlagen zu Traktionsbatterien sowie auf End-of-Life-Strategien und auf die Demontage-Prozesskette eingegangen. Weiterhin werden der Stand der Forschung und Technik zur automatisierten Demontage von Traktionsbatterien vorgestellt und Herausforderungen und Handlungsbedarfe abgeleitet.

2.1.1 Grundlagen zu Lithium-Ionen-Traktionsbatterien

Der Aufbau von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien, welche vorwiegend auf dem aktuellen Markt vertreten sind, lässt sich in drei Ebenen unterteilen: Batteriesysteme bzw. -pack bestehen aus Batteriemodulen, welche wiederum die Lithium-Ionen-Batteriezellen beinhalten (vgl. Abbildung 2–1). Die elementaren Bestandteile auf Packebene sind Batteriemodule, Gehäuse, Kühlsystem, Batteriemanagementsystem (BMS) sowie Hochvolt- bzw. 12-V-Anschlüsse. (Kampker 2014)

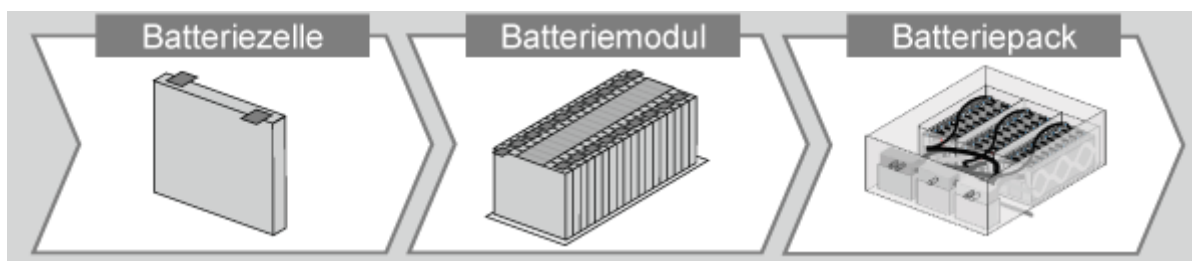


Abbildung 2–1: Hierarchischer Aufbau von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (Kampker 2014)

Analog dazu bestehen Batteriemodule aus Batteriezellen, Zellfixierung, Gehäuse, Batteriemanagementsystem (BMS), Kühlsystem sowie der Zellkontaktierung. Die Batteriezellen (bei Batteriemodulen mit Pouch- und prismatischen Zellen in gestapelter Form) als elementare Energiespeichereinheit werden durch die Primär- und Sekundärzellfixierung zusammengehalten. Die Pole der einzelnen Zellen sind durch die Zellkontaktierung elektrisch miteinander verbunden. Zur Verbindung wird häufig, insbesondere bei Batteriemodulen mit prismatischen Zellen, ein Zellverbindungselement (engl.: Busbar) eingesetzt. Das Kühlsystem mit thermischem Kontakt zu den Zellen ist verantwortlich für das Halten der Zelltemperatur in einem optimalen Betriebsfenster im Bereich

von 0 bis 40 °C. Das BMS überwacht den Zustand der Zellen und steuert die gesamten Batteriesystemaktivitäten. Das Gehäuse schützt die empfindlichen Komponenten vor externen, schädlichen Einflüssen. Der Aufbau eines Batteriemoduls ist in Abbildung 2–2 dargestellt. (Gerlitz et al. 2021a)

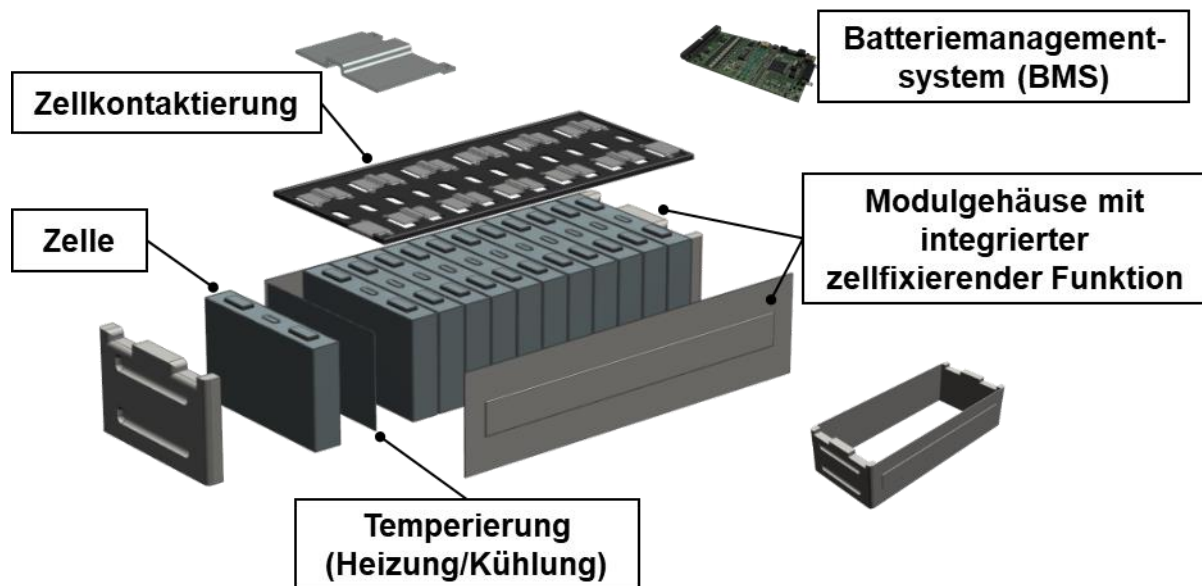




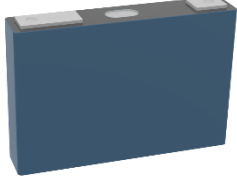
Abbildung 2–2: Beispielhafter Aufbau eines Batteriemoduls mit prismatischen Zellen in Anlehnung an (Fleischer et al. 2021)

Die hohen Anforderungen an die elektrische Zellkontaktierung, wie beispielsweise der geringe Übergangswiderstand, die hohe mechanische Festigkeit oder die Materialkompatibilität, lassen nur wenige geeignete Fügeverfahren zu. Besonders geeignete Verfahren mit einem hohen Manufacturing Readiness Level (dt.: Produktionsreifegrad) sind Schweißverfahren wie Ultraschall- oder Laserschweißen. (Das et al. 2019)

Lithium-Ionen-Batteriezellen werden in Form von Pouch-, Rund- oder prismatischen Zellen hergestellt. Die Pouchzelle, auch als Flach- bzw. „Coffee bag“-Zelle bezeichnet, ist durch ein labiles Zellgehäuse, bestehend aus einer Verbundfolie (Polyamid/Walzaluminium/Polypropylen), gekennzeichnet. Rundzellen sowie prismatische Zellen hingegen weisen ein festes metallisches Gehäuse (engl.: Hardcase) auf, das in der Regel aus Aluminium oder Edelstahl besteht. Im Zellgehäuse befindet sich neben dem Elektrolyten entweder ein Elektrodenstapel oder ein Elektrodenwickel (Flach- bzw. Rundwickel) aus einem Anode-Separator-Kathode-Verbund. Der Stapel bzw. Wickel wird an die Ableitertabs (Pouchzelle) bzw. Terminals (Rund- oder prismatische Zellen) elektrisch kontaktiert. Für die zellinterne Kontaktierung kommen Ultraschall- oder Laserschweißen zum Einsatz. Eine Darstellung mit den Vor- und Nachteilen der

genannten Zelltypen ist in Tabelle 2-1 aufgelistet. (Gerlitz et al. 2021a; Kampker 2014; Korthauer 2013)

*Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der drei Zelltypen in Anlehnung an (Kampker 2014)
(Bildquelle: (Gerlitz et al. 2021a))*

Pouchzellen	Rundzellen	Prismatische Zellen
		
<p>+</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Energiedichte • Geringes Gewicht • Gute Kühleigenschaft • Flexibilität in der Formgebung 	<ul style="list-style-type: none"> • Stabiles Gehäuse • Erfahrung mit dem Produktionsprozess • Hohe Lebensdauererwartung 	<ul style="list-style-type: none"> • Stabiles Gehäuse • Effiziente Bau-raumausnutzung • Dichtigkeitsgewährleistung
<p>-</p> <ul style="list-style-type: none"> • Labiles Gehäuse (stabiles Gehäuse auf Modulebene erforderlich) • Dichtigkeitsproblematik • Aufblähung beim Druckaufbau 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwendige Kühlung • Ineffiziente Bau-raumausnutzung • Mangelnde Gestaltungsflexibilität Batteriesystem 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwendige Kühlung

Bei Lithium-Ionen-Zellen ist die Kathode ein lithiiertes Metalloxid, auf einer Aluminiumfolie beschichtet. Die Anode besteht aus einer graphitbeschichteten Kupferfolie. Häufig eingesetzte Kathodenmaterialien sind LiCoO_2 (LCO), LiMn_2O_4 (LMO), $\text{LiNi}_x\text{Co}_x\text{Al}_x\text{O}_2$ (NCA), $\text{LiNi}_x\text{Mn}_x\text{Co}_x\text{O}_2$ (NMC), LiNiO_2 (LNO) sowie LiFePO_4 (LFP). (Kurzweil & Dietlmeier 2015)

Je nach genutzten Anoden- bzw. Kathodenmaterialien sind beim Laden und Entladen jeweils unterschiedliche Volumenänderungen zu verzeichnen, welche sich auf die Gestalt bzw. Dicke des Zellgehäuses auswirken können. Bei Zellen mit NMC-Kathoden wird von Volumenänderungen im Bereich von ein bis zwei Prozent berichtet (Kurzweil & Dietlmeier 2015). (Rieger et al. 2016) weist Volumenänderungen bis 2,4 % bei Zellen mit LCO-Kathoden nach.

Eine Alternative zur 3-Ebenen-Architektur (Pack-Modul-Zelle) bei Traktionsbatterien stellt die Cell-to-Pack- (CTP) oder Cell-to-Chassis-Technologie dar. Die Modulebene

wird hierbei übersprungen, das heißt, es findet eine direkte Integration der Zellen in das Batteriepack bzw. in das Fahrzeugchassis statt. Die Vorteile sind aufgrund des Wegfalls von (strukturellen) Komponenten höhere gravimetrische und volumetrische Dichten auf Batteriesystemebene sowie die Reduzierung der Montageschritte und der Produktionskosten. (Gerlitz et al. 2021b)

Von Lithium-Ionen-Zellen gehen unterschiedliche Gefahren für Personen und Umwelt aus, was eine korrekte Handhabung bzw. Sicherheitsmaßnahmen erfordert. Die Gefahren lassen sich in elektrische, chemische sowie Feuer- und Explosionsgefahr unterteilen. Durch die serielle Verschaltung der Zellen liegen Spannungsniveaus über 300 V auf Batteriesystemebene vor. Dies bildet eine elektrische Gefahr für Menschen, die bei unsachgemäßer Handhabung zum elektrischen Schock und damit verbundenen Folgeschäden führen kann. Chemische Gefahren werden durch die Bestandteile im Inneren der Zellen sowie Produkte aus Folgereaktionen, die während des Lebenszyklus der Batterie oder unter falscher Nutzung entstehen, repräsentiert. Beispiele für gefährliche Inhaltsstoffe sind Nickel und Kobalt, welche als karzinogen eingestuft werden. Das enthaltene Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6) kann bei Kontakt mit Wasser hochgiftige und aggressive Flusssäure (HF) bilden. Eine thermische Gefahr ist das thermische Durchgehen (engl.: Thermal Runaway, kurz TR), eine exotherme Reaktion, welche in einen Brand aufgrund der entflammbaren Zellbestandteile (wie beispielsweise die Carbonate im Elektrolyten) mündet. Ursachen für einen TR können (I) Überladung, (II) externer Kurzschluss oder (III) mechanischer Missbrauch (Durchdringung eines spitzen Gegenstandes oder Quetschen bzw. Biegen der Zellen) sein. Letzteres führt zu einem inneren Kurzschluss. Eine weitere Ursache für den TR stellt eine (IV) externe Wärmequelle dar. Die vier genannten Ursachen können zu einem Überhitzen der Zellen führen, was in einen TR münden kann. Zudem bilden die entflammbaren, gasförmigen Produkte aus der chemischen Reaktion eine Explosionsgefahr. (Korthauer 2013; Kwade 2018; Zhang et al. 2018a)

Die gezeigten Gefahren stehen in Interaktion miteinander und müssen daher gesamtheitlich betrachtet werden. Als Beispiel soll folgende kausale Kette der Gefahrenzustände dies verdeutlichen:

Externer (elektrischer) Kurzschluss → Erwärmen und Überhitzung der Zelle
→ Thermal Runaway → Explosion → Austritt giftiger Bestandteile

2.1.2 EoL-Strategien bei Traktionsbatterien

Nach (Becker et al. 2019) bildet das State-of-Health (SOH) den Alterungszustand einer Batterie über die Lebensdauer ab. Ein SOH unter 80 Prozent, was einer Restkapazität der Batterie von 80 Prozent entspricht, gilt derzeit als Ausschlusskriterium für den Einsatz von Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen. Nach dem Lebensende (engl.: End-of-Life, kurz EoL) existieren unterschiedliche EoL-Strategien zur Verwertung der aussortierten Traktionsbatterien, die in den wichtigsten 3R-Strategien (Remanufacturing, Reuse und Recycling) zusammengefasst werden. Nachfolgend werden diese näher erläutert. Für weitere existente R-Strategien wird auf (Becker et al. 2019) verwiesen.

Die „Wiederinstandsetzung der Traktionsbatterien zur **Wiederverwendung**“ (engl.: **Remanufacturing for reuse**) nach (Becker et al. 2019) umfasst die Zuführung der Batteriemodule nach Prüfung der Funktionsfähigkeit und der Leistungsdaten in die ursprünglich vorgesehene Verwendung. Bei erforderlichen Reparaturmaßnahmen werden diese durchgeführt. (Becker et al. 2019)

Das Szenario „Umwidmung von Traktionsbatterien für die **Weiterverwendung**“ (engl.: **Reuse**) nach (Becker et al. 2019) zielt auf den Einsatz der Batteriemodule in Bereichen mit geringeren Leistungs- und Energieanforderungen ab. Stationäre Anwendungen, wie Energiespeicher für Heimanwendungen, haben sich als besonders geeignet herausgestellt. Aufgrund einer reduzierten Beanspruchung der Zellen ist die Verwendung über mehrere Jahre bis hin zu Jahrzehnten denkbar. (Becker et al. 2019; Casals et al. 2019; Stübler & Meir 2019)

Beim **Recycling** werden durch physikalische (z. B. mechanische Separation, Wärmebehandlung) sowie chemische Verfahren (z. B. Auslaugung, Lösungsmittlextraktion, chemische Ausfällung) wertvolle Rohstoffe, wie Kobalt, Nickel und Kupfer, aus den Batteriezellen wiedergewonnen. Eine Verkettung der genannten Verfahren ermöglicht eine Rückgewinnungsrate mit hohem Reinheitsgrad. Vor dem Recycling werden z. T. die Batteriesysteme entladen. Eine Entladung kann (I) mittels einer elektronischen Last an einem Entladegerät, (II) in einer Salzlösung oder (III) durch eine thermische Deaktivierung (im Bereich von 300 °C) erfolgen. Die Tiefentladung bzw. das Unterschreiten der unteren Abschaltspannung im Bereich von 2,2 bis 2,7 V führt zu irreversibler Beschädigung des Aktivmaterials. Ein Wiedereinsatz von tiefentladenen und damit beschädigten Zellen ist folglich ausgeschlossen. (Becker et al. 2019; Harper et al. 2019; Kurzweil & Dietlmeier 2018; Xu et al. 2008)

Nach (Harper et al. 2019) haben sich aktuell die folgenden drei Verfahrensrouten für das Recycling von Traktionsbatterien bewährt:

- **Pyrometallurgische Verfahren:** Bei hohen Temperaturen (ca. 1000 °C) werden z. B. in einem Schmelzofen die Batterien eingeschmolzen und metallische Wertstoffe wiedergewonnen. Der Fokus liegt auf der Gewinnung von Kobalt und Nickel. Lithium hingegen kann nur unter sehr hohem Aufwand oder in Kombination mit hydrometallurgischen Verfahren gewonnen werden. Kunststoffe und der Elektrolyt zersetzen sich bei den Temperaturen und gehen daher verloren. (Becker et al. 2019; Harper et al. 2019; Zhang et al. 2018b)
- **Hydrometallurgische Verfahren:** Unter Einsatz von chemisch-wässrigen Lösungen können Übergangsmetalle zurückgewonnen werden. Die Laugung überführt gezielt bestimmte Komponenten mithilfe von Lösungsmitteln in eine wässrige Phase und trennt diese somit von den restlichen Bestandteilen ab. Bei der Kristallisation bzw. Fällung werden hingegen durch Übersättigung bzw. Ausflocken bestimmte Rohstoffe als Feststoff wiedergewonnen. Durch Filtrationsprozesse wird die flüssige von der festen Phase separiert. (Becker et al. 2019)
- **Direktes Recycling:** Hierbei wird das Anoden- bzw. Kathodenmaterial direkt mechanisch von den Elektroden entfernt. Es kann in anderen Lithium-Zellen mit minimalen Veränderungen an der Kristallmorphologie des Aktivmaterials (Kathode) eingesetzt werden. Die Lithiumverluste u. a. aufgrund der Materialdegradation während der Nutzung der Batterien müssen dabei ausgeglichen werden. Dies kann entweder durch eine Festkörpersynthese mit frischem Li_2Co_3 erfolgen oder hydrothermisch mithilfe einer $\text{LiOH}/\text{Li}_2\text{SO}_4$ -Lösung geschehen. (Harper et al. 2019)

Für weiterführende Informationen und einen Vergleich der drei Verfahrensrouten wird auf (Harper et al. 2019) verwiesen.

Die Abfallhierarchie (engl.: Waste management hierarchy) mit dem Ziel der Vermeidung von Abfällen definiert nach (United Nations Environment Programme 2014) eine zu bevorzugende Reihenfolge an Aktionen. Diese sind pyramidenförmig aufgebaut und beinhalten (1) Prevention, (2) Reduction, (3) Recycling, (4) Recovery sowie (5) Disposal. Übertragen auf die oben genannten EoL-Strategien für Traktionsbatterien bedeutet dies, dass die Strategien in folgender Reihenfolge zu präferieren sind: (1) Wiederverwendung, (2) Weiterverwendung, (3) Recycling. Dabei sind die ersten beiden

Strategien zu bevorzugen, da noch die Funktionsfähigkeit der Zellen erhalten bleibt. Beim Recycling ist dagegen nur der Materialwert der enthaltenen wertvollen Rohstoffe, wie z. B. Kobalt, Nickel oder Kupfer, wirtschaftlich von Bedeutung. (Harper et al. 2019)

Jede der genannten Strategien erfordert eine möglichst hohe Demontagetiefe. Bei Pyro- oder hydrometallurgischen Recyclingverfahren findet die Zerlegung aus wirtschaftlichen Gründen lediglich bis auf Batteriemodulebene statt. Die Demontage von Batteriepack zu Modulen wird aktuell durch qualifiziertes Fachpersonal händisch durchgeführt, eine Automatisierung der Prozessschritte ist nur schwer realisierbar. (Becker et al. 2019; Harper et al. 2019)

Das direkte Recycling weist im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren aufgrund der höchsten Recyclingraten bzw. Menge der gewonnenen Materialien sowie der geringsten Abfallaufkommen ein großes Potenzial auf. Es lassen sich nahezu alle essenziellen Rohstoffe, wie Kobalt, Nickel, Kupfer, Mangan, Aluminium sowie Lithium, wiedergewinnen. Ein großer Vorteil ist zudem, dass die Kathodenmorphologie erhalten bleibt und ein Direkteinsatz der Materialien möglich ist. Voraussetzung für das direkte Recycling ist die Zerlegung des Batteriepacks bis auf Zellebene bzw. Elektrodenenebene. (Harper et al. 2019)

Oft sind für den Ausfall des gesamten Batteriepacks sowie der -module einige wenige Lithium-Ionen-Zellen verantwortlich, welche die restlichen intakten Zellen unbrauchbar machen (Richa et al. 2014). Für eine Wieder- bzw. Weiterverwendung ist der Austausch der defekten Zellen erforderlich, was auch eine Demontage bis auf Zellebene voraussetzt (Schäfer et al. 2020).

Alles in allem stellen die EoL-Strategien **direktes Recycling** sowie **Wiederverwendung** bei Traktionsbatterien vielversprechende Ansätze mit einem hohen Werterhalt der Komponenten bzw. Rohstoffe durch eine hohe Recyclingrate dar. Jedoch ist eine beträchtliche Demontagetiefe bis auf Zellebene erforderlich, wobei die Demontage wegen der genannten Gründe aus Kapitel 1.1 möglichst vollautomatisiert erfolgen sollte. Nachfolgend werden ausgewählte Forschungsarbeiten zur Automatisierung der Demontageprozesse bei Traktionsbatterien dargelegt.

2.1.3 Forschungsarbeiten zur Demontageprozessautomatisierung

Es existieren bereits unterschiedliche Forschungsarbeiten, welche sich mit der Automatisierung bzw. Teilautomatisierung von essenziellen Prozessschritten bei der Demontage von Traktionsbatterien befassen. Eine Übersicht über Forschungsarbeiten mit praktischem Bezug ist in Tabelle 2-2 aufgelistet.

Tabelle 2-2: Forschungsarbeiten zum Thema Demontage von Traktionsbatterien

Arbeit	Demontage-schritt	Fahrzeugmodell (Zelltyp)	Fokus
(Alfaro-Algaba & Ramirez 2020)	P2M	Audi A3 Sportback e-tron PHEV (Prismatisch)	(A2)
(Choux et al. 2021)	P2M	Audi A3 Sportback e-tron PHEV (Prismatisch)	(A2), (A5)
(Gumanova & Sobotova 2019)	P2M	Volkswagen Jetta PHEV (Prismatisch)	(A2)
(Hellmuth et al. 2021)	P2M	Audi Q5 PHEV (Prismatisch), Chevrolet Bolt 2017 (Pouch)	(A2), (A1)
(Kampker et al. 2020)	M2Z	k. A. (Rund, Prismatisch, Pouch)	(B1), (B2)
(Markowski et al. 2014)	P2Z, Z2E	k. A. (Rund)	(B3)
(Poschmann et al. 2021)	P2M	Volkswagen eUp (k. A.)	(A4), (A5)
(Rallo et al. 2020)	P2M	Smart ForFour (Pouch)	(A1)
(Rosenberg et al. 2022)	P2M	Mercedes PHEV (Pouch)	(A2), (A1)
(Schäfer et al. 2020)	M2Z	k. A. (Prismatisch)	(B1)
(Schmitt et al. 2011)	k. A.	k. A. (Pouch)	(A3), (A4)
(Wegener et al. 2014)	P2M	Audi Q5 Hybrid (Prismatisch)	(A2)
(Wegener et al. 2015)	P2M, (M2Z)	Audi Q5 Hybrid (Prismatisch)	(A3), (A5)
(Zorn et al. 2022)	P2M	Audi e-tron (k. A.), Volkswagen k. A. (k. A.)	(A5)

k. A. = keine Angabe

Hierbei können die Arbeiten in folgende vier Klassen in Abhängigkeit vom fokussierten Demontageschritt eingeteilt werden: Batteriepack zu -modul (P2M), Batteriemodule zu -zelle (M2Z), Batteriepack zu -zelle (P2Z) sowie Zelle zu Elektroden (Z2E).

Forschungsarbeiten, die sich ausschließlich mit dem Demontageschritt Batteriepack zu -moduldemontage beschäftigen, konzentrieren sich vorwiegend auf:

- (A1) Automatisierungspotenzial-/Kostenanalyse
- (A2) (Optimierte) Planung der Demontageaufgaben bzw. -reihenfolge/-tiefe
- (A3) Entwicklung von physischen Demontagetechnologien wie Zellhandhabung oder Lösen von Schraubverbindungen
- (A4) Steuerungsarchitektur
- (A5) Kamerabasierte Objektdetektion, -lokalisierung sowie sensorbasierte Materialdetektion

Arbeiten mit Fokus auf den Demontageschritt Batteriemodul zu -zelldemontage adressieren die Themen:

- (B1) Design for Disassembly / Remanufacturing
- (B2) Prozessuntersuchung für Füge- und Trennprozess
- (B3) Entwicklung von Demontagetechnologien

Auf Packebene ist eine vollständige Automatisierung u. a. aufgrund des komplexen Aufbaus des Batteriesystems nicht möglich bzw. nicht die wirtschaftlichste Lösung, die Teilautomatisierung einzelner Prozessschritte ist in Anbetracht der steigenden Stückzahlen sinnvoll (Alfaro-Algaba & Ramirez 2020; Gumanova & Sobotova 2019; Schmitt et al. 2011; Wegener et al. 2014). Zweckmäßig ist der Einsatz von hybriden Demontagestationen, die eine Mensch-Roboter-Kollaboration ermöglichen (Gumanova & Sobotova 2019). Der Roboter kann hierbei einfache, wiederholende Aufgaben übernehmen, wie das kamerabasierte Abschrauben (Wegener et al. 2014). Die Bestimmung des optimalen Automatisierungsgrades kann durch eine Evaluierung des Automatisierungspotenzials erfolgen (Hellmuth et al. 2021). (Zorn et al. 2022) weisen auf die hohe Variantenvielfalt hin, während (Blankemeyer et al. 2021) die zahlreichen Gefahren durch die Lithium-Ionen-Zellen ansprechen.

Forschungsarbeiten zur Automatisierung der Demontage von Batteriemodulen bis auf Zellebene sind dagegen nur wenige vorhanden. Diese adressieren vor allem die End-of-Life-Strategie Remanufacturing, der Fokus hierbei liegt auf dem Design-for-

Disassembly bzw. Design-for-Remanufacturing (Kampker et al. 2020; Schäfer et al. 2020). In (Schäfer et al. 2020) wird der Austausch von unlösbaren Fügeverbindungen (z. B. Schweißverbindungen) durch lösbare (z. B. Schraubverbindungen) vorgeschlagen, was das Remanufacturing vereinfachen bzw. erst ermöglichen soll. In (Kampker et al. 2020) werden Füge- und Trennverfahren für Zellkontaktierungen sowie Batteriemodulgehäuse geprüft. Für das Fügen und Trennen kommt dasselbe Werkzeug (4-kW-Scheibenlaser) zum Einsatz. Ein weiteres Thema im Bereich der Automatisierung der Batteriemodul-Demontage ist die Entwicklung von Demontagetechnologien. In (Markowski et al. 2014) wird in diesem Zusammenhang eine hydraulische Auspress-einheit für Rundzellen vorgestellt.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass zum derzeitigen Stand der Forschung deutlich weniger Arbeiten zur Automatisierung der Moduldemontage als zur Demontageauto-matisierung von Batteriepacks vertreten sind. Aus technischer Sicht wird, wie bereits in Kapitel 2.1.2 dargelegt, das Batteriepack bis auf Modulebene durch qualifiziertes Fachpersonal händisch zerlegt. Eine vollständige (und automatisierte) Zerlegung von Batterie-modulen findet aktuell nicht statt. Stattdessen werden diese z. B. als Ganzes bzw. teilweise zerlegt im Kontext des pyrometallurgischen Recyclings eingeschmolzen oder für hydrometallurgische Prozesse geschreddert. Dies weist klar auf einen Handlungsbedarf zur vollständigen Zerlegung von Batteriemodulen hin, weswegen im Folgenden die Batteriemoduldemontage fokussiert wird. Der defizitäre Stand der automatisierten Batteriemoduldemontage ist insbesondere auf die zahlreichen Herausforderungen bei der Demontage zurückzuführen, welche im nachfolgenden Kapitel näher vorgestellt werden.

2.1.4 Prozesskette und Herausforderungen bei der Moduldemontage

Nachfolgend werden die Prozesskette bei der Batteriemoduldemontage aufgezeigt sowie Herausforderungen für die Automatisierung identifiziert.

2.1.4.1 Prozesskette bei der Demontage von Batteriemodulen

Die Demontageprozesskette kann grundsätzlich als Umkehrung der Montageprozesskette verstanden werden. Auf Basis der grundsätzlichen Montagereihenfolge für Lithium-Ionen-Batteriemodule mit Verweis auf (Kampker et al. 2018) kann von der in Abbildung 2–3 gezeigten Demontagereihenfolge ausgegangen werden. Die Reihenfolge kann je nach vorliegender Batteriemodulvariante leicht variieren. Nichtsdestotrotz

stellen die gezeigten Schritte die elementaren Prozessschritte bei der Demontage von Batteriemodulen dar.

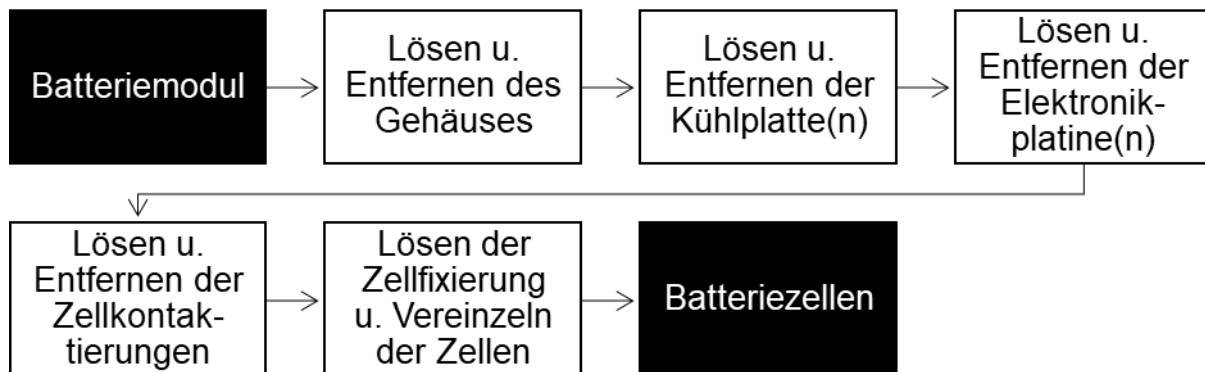


Abbildung 2–3: Prozesskette bei der Demontage von Batteriemodulen

Es wird bei der Demontage (ausgenommen Wareneingangstest/Befundung und Qualitätssicherung) zwischen Trenn-, Handhabungs- und Spannoperation unterschieden. Bei Trennoperationen kann zwischen dem Lösen von lösbaren und unlösbaren (reversiblen und irreversiblen) Fügeverbindungen unterteilt werden (Vongbunyong & Chen 2015). Da zum Lösen von lösbaren Fügeverbindungen mit der Schraubverbindung als Hauptvertreter bereits zahlreiche Forschungsarbeiten, wie z. B. (Nave 2003), sowie am Markt verfügbare Schrauberlösungen vorliegen, wie beispielsweise DEPRAG ER36-050 (Al Assadi et al. 2022), wird diese Forschungsrichtung im Folgenden nicht weiterverfolgt. Im Gegensatz dazu findet sich eine deutlich geringere Anzahl an Forschungsarbeiten zum Trennen von unlösbaren mechanischen Fügeverbindungen, wie z. B. Schweiß- oder Nietverbindungen (siehe Kapitel 2.2). Das Trennen der Zellkontaktierungen, welches ein hohes Automatisierungspotenzial aufweist, ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Gleichbleibende Operation mit einer hohen Anzahl (entspricht in etwa der Zellanzahl)
- Unterschiedlichste Varianten (Unterscheidung nach Zelltyp)
- Unmittelbare Nähe zu den Lithium-Ionen-Zellen
- Vorwiegend Schweißverbindungen, bedingt durch die hohen Anforderungen an die Fügeverbindung (Das et al. 2019)
- Undefinierte Positionen aufgrund geometrischer Verformungen innerhalb des Batteriemoduls, bedingt durch Volumenänderung der Zellen (Sauerteig 2018)

Aus diesem Grund wird die genannte Verbindung im Folgenden adressiert.

2.1.4.2 Herausforderungen bei der Demontage von Batteriemodulen und Ableitung des Handlungsbedarfs

Im Folgenden wird näher auf die Herausforderungen bei der Batteriemoduldemontage eingegangen. Ferner wird der Handlungsbedarf abgeleitet und es wird der Fokus der Arbeit definiert.

Gefahren durch Lithium-Ionen-Batteriezellen in Kombination mit unlösbaren Fügeverbindungen

Lithium-Ionen-Zellen sind durch zahlreiche Gefahren, wie Explosions-, Brand- oder chemische Gefahr, gekennzeichnet (Kwade 2018). Zudem beinhalten die Batteriemodule viele unlösbare Fügeverbindungen, welche in mechanische (z. B. Schweiß- oder Nietverbindung) und chemische (Klebeverbindung) unterschieden werden können (Gerlitz et al. 2021a). Zellkontaktierungen sind vorwiegend als Schweißverbindung ausgeführt und somit unlösbar gefügt. Nach (VDI 2343-3) erfordern unlösbare Fügeverbindungen teil- bzw. zerstörende Trennverfahren, wie z. B. Laserschneiden oder Fräsen. Der Einsatz dieser Trennverfahren in Kombination mit den Gefahren, die von den Lithium-Ionen-Zellen ausgehen, stellt eine große Herausforderung bei der Batteriemoduldemontage dar. So kann beispielsweise ein hoher Wärmeeintrag durch das Trennverfahren, wie dies beim Laserschneiden oder Fräsen der Fall ist, im schlimmsten Fall zu einem thermischen Durchgehen bei Lithium-Ionen-Zellen führen, was schließlich mit einem Brand oder mit einer Explosion enden kann.

Die Auswahl eines geeigneten Trennprozesses und die anschließende Prozessuntersuchung mit dem entsprechenden Prozessverständnis unter Berücksichtigung der produktspezifischen Randbedingungen ist daher unbedingt erforderlich.

Variantenvielfalt der Batteriemodule

Durch das Fehlen eines standardisierten Designs aufgrund fehlender Normen für das Batteriemodul (Harper et al. 2019) sowie durch die drei unterschiedlichen Zelltypen, welche das Batteriedesign stark beeinflussen (Warner 2015), herrscht eine große Variantenvielfalt bei den Batteriemodulen im Hinblick auf z. B. Größe, Komponentenanordnung, Fügeverbindungen. Arbeiten zur Standardisierung des Batteriemoduldesigns, wie von (Lesemann et al. 2013), liegen zwar vor, sind jedoch in der Praxis nicht vollständig umgesetzt worden. Für eine variantenreiche Demontage sind konventionelle

Transferstraßen, die für hohe Losgrößen und wenige Varianten ausgelegt sind, nicht geeignet.

Die variantenflexible Batteriemoduldemontage setzt somit ein flexibles Demontagesystem voraus. Für eine wirtschaftliche Lösung sind Ansätze zur beschleunigten Inbetriebnahme bzw. Einrichtung durch eine (automatisierte) Demontageplanung heranzuziehen. Die Demontageplanung kann beispielsweise auf Basis von CAD-Daten erfolgen.

Geometrische Verformungen durch Atmungseffekt der Lithium-Ionen-Zellen und durch Bauteiltoleranzen

Bedingt durch den Atmungseffekt beim Laden und Entladen kommt es bei Lithium-Ionen-Zellen zu einer Dickenänderung. Dabei werden relative Schwankungen im Bereich von 2,4 % beobachtet (Rieger et al. 2016). Beim Tiefentladen tritt ebenfalls eine Dickenänderung auf, die für die getesteten Zellen etwa 9,6 % beträgt (LI et al. 2008). Zudem unterliegt die Geometrie von Lithium-Ionen-Zellen herstellungsbedingten Toleranzen; für die Varta-Zelle LPP 402025 CE (vgl. Anhang 11.6) wird beispielsweise eine relative Schwankung von $\pm 7,5$ % angegeben. All diese Effekte führen zu unbekannten Verschiebungen von Trennstellen, beispielsweise an der Zellkontaktierung, gegenüber dem bekannten idealen Zustand, der z. B. durch technische Zeichnungen oder CAD-Modelle spezifiziert wird. Fehlende Kenntnisse über die genaue Lage von Fügeverbindungen können zum Verfehlen der Trennstelle mit dem Trennwerkzeug oder gar zur Beschädigung des Zellgehäuses führen, was fatale Folgen haben kann.

Diese Tatsache macht die sensorbasierte Erfassung der Geometrie des Batteriemoduls unabdingbar. Im Kontext der CAD-basierten Demontageplanung ist zudem ein Abgleich der Sensordaten des realen Objekts mit der CAD-Datei erforderlich, um die tatsächlichen Zielpositionen am realen Objekt zu ermitteln.

Zusammenfassung

Die von den Lithium-Ionen-Zellen ausgehenden zahlreichen Gefahren motivieren stark, die Zerlegung der Batteriemodule möglichst vollautomatisiert ablaufen zu lassen, um die betroffenen Personen nicht den Gefahren auszusetzen. Die Variantenvielfalt der Batteriemodule erfordert jedoch eine flexible Demontageanlage. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen werden Ansätze zur beschleunigten Inbetriebnahme bzw. Einrichtung durch eine automatisierte Demontageplanung empfohlen.

Der Fokus der vorliegenden Dissertation liegt auf dem automatisierten und flexiblen Trennen der Zellkontaktierungen, gekennzeichnet durch eine hohe Anzahl, die unmittelbare Nähe zu den Zellen, die geschweißte Verbindungsart sowie die undefinierte Lage.

Die Auswahl eines passenden Trennprozesses und anschließende Prozessuntersuchungen unter Berücksichtigung produktbezogener Randbedingungen gewährleisten die Prozess- und Produktsicherheit. Ein flexibles Demontagesystem in Verbindung mit einer automatisierten Demontageplanung ermöglicht eine automatisierte Demontage bei gleichzeitig hoher Flexibilität. Mithilfe von Sensorik zur Erfassung der Produktgeometrie und einer geeigneten Datenverarbeitung können geometrische Verformungen erfasst und kompensiert werden. Nachfolgend wird näher auf die Themen Trennverfahren, Demontagesystem/-planung sowie sensorbasierte Geometrieerfassung des Demontageobjekts eingegangen.

2.2 Trennverfahren

Ein essenzieller Prozessschritt bei der Demontage ist das Trennen diverser Fügeverbindungen am Demontageobjekt (Vongbunyong & Chen 2015). Je nach Verbindungsart wird zwischen (I) nicht-zerstörenden, (II) teilzerstörenden und (III) zerstörenden Verfahren unterschieden (Vongbunyong & Chen 2015):

- (1) Nach einer **nicht-zerstörenden** Trennung bleiben alle Komponenten unbeschädigt, was besonders für Reuse und Remanufacturing geeignet ist. Diese Demontageart kann bei lösbaren Fügeverbindungen, wie der Schraubverbindung (durch Abschrauben), eingesetzt werden. Trotz verfügbarer Systeme, wie z.B. DEPRAG ER36-050 (Assadi 2022), welches auch für das Abschrauben eingesetzt werden kann, ist der Ansatz meist unwirtschaftlich.
- (2) Beim **teilzerstörenden** Trennen werden bei möglichst geringer bzw. kleiner Beschädigung der Hauptkomponente nur die verbindenden Komponenten zerstört. Beispiele hierfür sind das Ausbohren oder Abschneiden des Schraubenkopfes. Der Ansatz ist insbesondere robust gegenüber Unsicherheiten des Produktzustandes und der -geometrie. In vielen Fällen hat sich dieser Ansatz als eine wirtschaftliche Lösung erwiesen.
- (3) Bei **zerstörenden** Verfahren werden hinderliche Komponenten vollständig oder teilweise beschädigt. Beispielsweise kann mittels Plasmaschneiden das Metallgehäuse von Verbrauchsgütern, wie Waschmaschinen (Uhlmann 2001),

aufgeschnitten werden. Auch hier kann von einem effizienten Umgang mit Unsicherheiten des Produktzustandes ausgegangen werden, was einen wirtschaftlichen Betrieb gestattet.

In Batteriemodulen überwiegen nach (Gerlitz et al. 2021a) unlösbare Fügeverbindungen, welche zerstörende Verfahren erfordern. Es wird vor allem zwischen

- a) unlösbaren mechanischen (z. B. Schweiß- und Nietverbindungen) und
- b) unlösbaren chemischen Verbindungen (Klebeverbindungen)

unterschieden. Bei a) und b) ist jeweils eine andere Klasse an Trennverfahren erforderlich (Gerlitz et al. 2021a).

Der vorliegende Anwendungsfall „**Trennen der Zellkontaktierungen**“ kann dem **teilzerstörenden Trennen** zugeordnet werden. Dabei handelt es sich um das Trennen einer **mechanischen, unlösbaren Fügeverbindung**. Hierbei wird im ungünstigsten Fall die verbindende Komponente (das geschweißte Zellverbindungselement, engl.: Busbar) zerstört, während die Lithium-Ionen-Zellen vom Trennprozess unberührt bleiben sollen. Im Anschluss wird eine Übersicht über eine Auswahl möglicher Trennverfahren gegeben.

2.2.1 Eingegrenzte Übersicht von Trennverfahren

Eine Übersicht über eine Auswahl möglicher Trennverfahren für das Trennen von mechanischen, unlösbaren Fügeverbindungen ist in Abbildung 2–4 aufgelistet. Die Grundlage für die Auswahl bildet die dritte Hauptgruppe *Trennen* nach (DIN 8580). Die Untergruppen (3.1) *Zerteilen*, (3.2) *Zerspanen mit geometrisch bestimmten Schneiden* und (3.3) *Zerspanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden* sind hierbei von wesentlicher Bedeutung. Nach dem Stand der Forschung erprobte Verfahren sind das Plasma (Uhlmann et al. 2001) und das Laserstrahlschneiden (Kampker et al. 2020). Außerdem wäre der Einsatz des Wasserstrahlschneidens denkbar. Diese drei genannten Verfahren werden nachfolgend unter *strahlbasierte Trennverfahren* zusammengefasst betrachtet. Als letztes mögliches Verfahren ist das (Schneid-)Erodieren (z. B. mit Draht) aufgeführt, welches gemäß (DIN 8590) der Untergruppe (3.4) *Abtragen* zuzuordnen ist. Im Folgenden wird auf die Verfahren näher eingegangen.

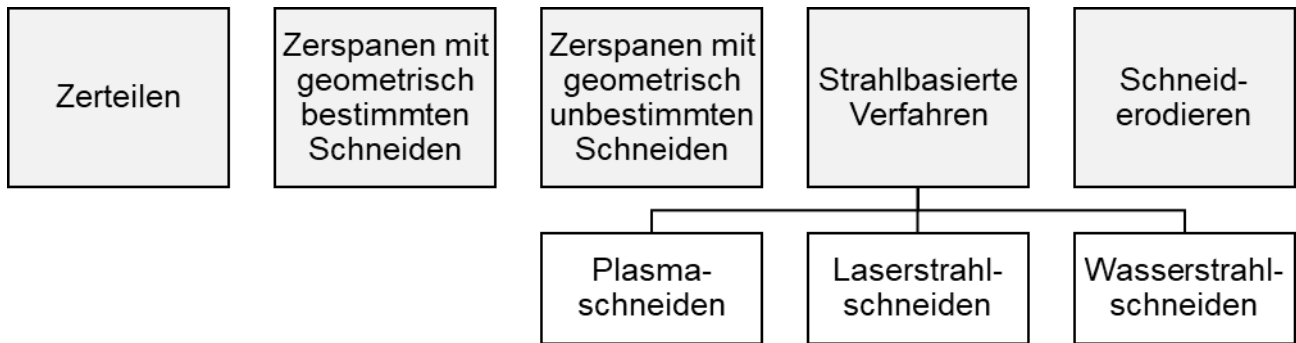


Abbildung 2–4: Mögliche Trennverfahren für mechanische, unlösbare Fügeverbindungen

Zerspanen mit geometrisch bestimmten Schneiden

Beim **Zerspanen mit geometrisch bestimmten Schneiden** findet der Materialabtrag vom Werkstück unter Spanbildung statt, die Position der Schneiden ist eindeutig bestimmt. Hauptvertreter sind das Drehen, Bohren und Fräsen. Die hohe Genauigkeit bei der Fertigung sowie die sehr große Bearbeitungsflexibilität sprechen für diese Verfahrensgruppe. (Fritz 2018)

Charakteristisch für das Zerspanen ist die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. Unterschieden wird zwischen Schnitt- und Vorschubbewegung. Die Schnittbewegung bildet sich aus dem Vektor tangential zur Rotationsbewegung an dem Kontaktpunkt zwischen Werkzeug und Werkstück. Die Schnittgeschwindigkeit v_c ist mit Angabe des Werkzeugdurchmessers d_w sowie der Drehzahl n gegeben durch $v_c = \pi * d_w * n$. Die Zustellung des Werkzeugs in das Werkstück wird als Vorschubbewegung bezeichnet und ist in Kombination mit der stetigen Schnittbewegung verantwortlich für den Materialabtrag. Die Vorschubgeschwindigkeit v_f kann mit Angabe des Zahnvorschubs f_z , der Zähnezahl z sowie der Drehzahl n gemäß der Vorschrift $v_f = f_z * z * n$ berechnet werden. (Apprich et al. 2020; Fritz 2018)

Das **Bohren** nach (DIN 8589-2) stellt ein Trennverfahren mit einer kreisförmigen Schnittbewegung dar. Die Werkzeugdrehachse liegt hierbei auf der Achse der erzeugten Innenfläche. Gleichzeitig findet Vorschubbewegung entlang dieser Achse statt. (Fritz 2018; Klocke 2018)

Beim **Fräsen** nach (DIN 8589-3) ist ebenfalls eine kreisförmige Schnittbewegung zu verzeichnen. Der Vorschub erfolgt senkrecht oder schräg gerichtet zur Drehachse. (Fritz 2018)

Mithilfe des **Schnittkraftmodells nach Kienzle** kann eine empirische Modellierung der Schnittkraft F_c gemäß der Formel $F_c = a_p * f_z * k_c$ mit Angabe der spezifischen Schnittkraft k_c , der Schnitttiefe a_p sowie des Zahnvorschubs f_z erfolgen. Die spezifische Schnittkraft k_c ist gegeben durch $k_c = k_{c1,1} * h^{-m_c}$ und insbesondere abhängig von der Spanungsdicke h . $k_{c1,1}$ spezifiziert hier die spezifische Schnittkraft für eine Spanungsbreite $b = 1 \text{ mm}$ und eine Spanungsdicke $h = 1 \text{ mm}$. Der Werkstoffparameter m_c zeigt eine Abhängigkeit von der Material-Werkzeug-Paarung. Die Berechnung weiterer Zerspankraftkomponenten, wie der Vorschub- F_f oder die Passivkraft F_p , erfolgt analog mit separaten Werten für k_f , k_p , m_f sowie m_p . (Fritz & Schulze 2015; Klocke 2018; Paucksch et al. 2008)

Die Spanungsdicke h beim Fräsen bildet eine Abhängigkeit vom Vorschubrichtungswinkel φ und stellt somit eine nicht konstante Größe dar. Das angepasste Schnittkraftgesetz für Fräsen lautet $F_c = \frac{a_p}{\sin(\kappa)} * k_{c1,1} * h(\varphi)^{1-m_c}$. Im Fall eines Vollnutfräsens ist die mittlere Spanungsdicke h_m gegeben durch $h_m = \frac{2}{\pi} * f_z * \sin(\kappa)$ mit Angabe des Zahnvorschubs f_z und des Einstellwinkels κ . Das Modell nach Kienzle findet seine Gültigkeit in Bezug zur Spanungsdicke nur abschnittsweise. Für die drei Bereiche

- (1) $10^{-3} \text{ mm} < h < 10^{-2} \text{ mm}$,
- (2) $10^{-2} \text{ mm} < h < 10^{-1} \text{ mm}$,
- (3) $10^{-1} \text{ mm} < h < 10^0 \text{ mm}$

ist jeweils ein eigener Wert für k_c und m_c zu bestimmen. (Klocke 2018; Paucksch et al. 2008)

Abhängig von den Schnittverhältnissen (inklusive Schnittparameter) und den zu zerspanenden Materialien können beim Zerspanen die **Spanarten** Fließ-, Scher- oder Reiß- bzw. Bröckelspan auftreten. Eine weitere Kategorisierung erfolgt anhand der **Spanform** unter Berücksichtigung der Spangeometrie. Der erschwerte Abtransport aufgrund der Länge spricht gegen die Spanformen Band-, Wirr- oder lange Wendelspäne. Zu bevorzugen ist die Entstehung von kurzen Wendelspänen, Wendelspanstücken, Spiralspänen oder Bröckelspänen. (Dietrich & Richter 2020; Fritz & Schulze 2015; Klocke 2018)

Bei der Zerspanung findet eine nahezu vollständige Umwandlung der aufgebrachten Wirkarbeit, bestehend aus Verformungs- und Reibungsarbeit, in Wärme statt. Aufgrund des Wärmeeintrags während der Zerspanung entstehen vier Wärmeströme - durch die

Luft \dot{Q}_{luft} , durch den Span \dot{Q}_{SP} , in das Werkzeug \dot{Q}_{WZ} und in das Werkstück \dot{Q}_{WS} -, die mit teils hohen Temperaturanstiegen verbunden sind. (Küstners 1956) zeigte beispielsweise bei der Zerspanung von Eisen Temperaturen über 1000 °C an der Spanfläche auf. Für die Temperaturmessung werden unterschiedlichste Verfahren, wie Kalorimetrie, Einsatz von Thermocolorfarben, thermoelektrische Messung sowie Strahlungsmessung, genutzt. Am häufigsten wird die Temperatur punktweise mit Thermoelementen bestimmt. Den größten Einflussfaktor auf die Maximaltemperatur stellt die Schnittgeschwindigkeit dar. Mit zunehmender Geschwindigkeit ist ein Abfall der Maximaltemperatur zu verzeichnen, ab einer gewissen (hohen) Geschwindigkeit stellt sich ein konstantes Niveau ein. (Klocke 2018)

Die Analyse der Temperaturentwicklung beim Trennen der Zellkontaktierungen durch Zerspanung ist angesichts der thermischen Gefahren durch Lithium-Ionen-Zellen von großer Bedeutung. Die anodische Reaktion beim Thermal Runaway beginnt bereits ab 90 °C (Lisbona & Snee 2011).

Zerspanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden

Verantwortlich für den Materialabtrag beim **Zerspanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden** sind zahlreiche kleine Schneiden mit undefinierten Positionen und Schneidgeometrien. Zu dieser Untergruppe gehören Schleifverfahren, bei der Schleifkörner das Material schichtweise abtragen. Der hohe Verschleiß bei diesem Verfahren kann als Nachteil aufgeführt werden. (Fritz 2018)

Zerteilen

Den Hauptvertreter beim **Zerteilen** mit industrieller Relevanz stellt das **Scherschneiden** dar. Die restlichen Verfahren, wie Reißen oder Brechen, sind wegen der mangelhaften Qualität der Trennflächen eher unbedeutend. Der Schnitt wird beim Scherschneiden durch die Bewegung von zwei parallelen bzw. schrägen Schneiden ausgeführt, der Schneidevorgang ist dabei mit plastischen Deformationen verbunden. Nachteilig ist, dass prinzipbedingt für das Werkzeug ein beidseitiger Zugang zur Schnittstelle erforderlich ist. (Fritz 2018)

Strahlbasierte Verfahren

Das **Plasmaschneiden** schmilzt bzw. verdampft den Werkstoff mithilfe eines Plasmas bei Temperaturen im Bereich von 20.000 K bis 30.000 K. Mithilfe eines Hilfslichtbogens bildet sich das Plasma, ein hochionisiertes Gas. Beim Kontakt mit dem Werkstoff

entsteht der Hauptlichtbogen, der zur Leistungserhöhung führt und für das Schneiden verantwortlich ist. Nachteilig beim Verfahren ist, dass es prinzipbedingt elektrisch leitende Materialien voraussetzt. (Böge et al. 2021; Fritz & Schulze 2015)

Das **Laserstrahlschneiden** findet unter Einsatz eines Lasersystems statt. Dabei verbrennt, schmilzt oder sublimiert der Werkstoff. Ein umgebendes Schutzgas wird insbesondere zum Entfernen des Werkstoffs aus der Fuge benötigt. Große Nachteile stellen der schlechte Wirkungsgrad von maximal 20 Prozent sowie die damit verbundene, aufwendige Kühlung dar. (Böge et al. 2021; Fritz & Schulze 2015)

Beim **Wasserstrahlschneiden** prallt ein beschleunigter Wasserstrahl mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 900 m/s auf der Werkstückoberfläche auf. Der dabei stattfindende Mikrozerspanungsprozess führt zur lokalen Zerstörung der Oberfläche des Werkstücks. Durch das stückweise Herauslösen der Werkstoffteilchen dringt der Strahl tiefer in den Werkstoff hinein. Die hohe Qualität des Schnittes, die geringe Materialbeanspruchung des Materials sowie die Materialflexibilität sprechen für dieses Verfahren. (Fritz & Schulze 2015)

Erodieren

Beim **Erodieren**, auch **funkenerosives Abtragen** genannt, findet der Werkstoffabtrag durch elektrische Entladungen an elektrisch leitfähigen Werkstücken in einem Dielektrikum statt. Die starke Erwärmung des Materials am Fußpunkt des sich bildenden Plasmakanals führt zum Verdampfen oder Schmelzen des Materials. Das Dielektrikum hat eine spülende und kühlende Wirkung. Ein Vertreter für das Erodieren ist das Drahterodieren, auch als **funkenerosives Schneiden mit Draht** bezeichnet, unter Einsatz eines Drahtes als Werkzeugelektrode. (Fritz & Schulze 2015)

Im Folgenden wird eine Auswahl an Forschungsarbeiten vorgestellt, bei denen zerstörende Trennverfahren für das Trennen von mechanischen, unlösbaren Fügeverbindungen zum Einsatz kommen. Im Anschluss wird ein Forschungsdefizit abgeleitet.

2.2.2 Forschungsarbeiten zu Trennverfahren

Ausgewählte Forschungsarbeiten, in denen zerstörende Trennverfahren für mechanische, unlösbare Fügeverbindungen im Kontext der Demontage eingesetzt wurden, sind in Tabelle 2-3 aufgeführt. Die Tabelle listet die Trennverfahren sowie die zu demontierenden Produkte auf.

Tabelle 2-3: Forschungsarbeiten mit Einsatz von zerstörenden Trennverfahren bei der Demontage

Arbeit	Zerstörendes Trennverfahren*	Produkt
(Chen et al. 2020; Vongbunyong & Chen 2015)	Schleifen, Bohren, Lochsäge	LCD-Monitor
(Basdere & Seliger 2003; Uhlmann et al. 2001)	Laserschneiden	Waschmaschinen
(Karlsson & Järrhed 2000)	Bohren (kraftbasiert)	Waschmaschinen-Motoren
(Kopacek & Kopacek 2006)	Bohren, Fräsen	Mobiltelefon
(Li et al. 2014)	Schleifen, Bohren, Fräsen	Elektronisches Steuergerät (ECU)
(Kampker et al. 2020)	Laserschneiden	Lithium-Ionen-Batteriemodul
(Nave 2003)	Schleifen, Bohren, Fräsen, Scherschneiden	Bildschirmgeräte
(Zahedi et al. 2016)	Schleifen, Tief-/Minimalbohren	Flugzeugbauteile
(Kim et al. 2022)	Laserschneiden	Komponenten aus Kernkraftwerken
(Uchiyama et al. 1999)	Kreissäge	Waschmaschinen u. Klimaanlage

* spanende Trennverfahren fett markiert

Bei den gezeigten Arbeiten werden vorwiegend spanende Verfahren, wie Schleifen, Bohren oder Fräsen, sowie weitere Verfahren, wie Scherschneiden oder Laserschneiden, eingesetzt, was die genannten Trennverfahren qualifiziert.

Ein **Vergleich** verschiedener zerstörender Trennverfahren wurde in (Nave 2003) beim Lösen von Schraubverbindungen an Bildschirmgeräten vorgenommen. Dabei wurden verschiedene Trennstrategien, wie z. B. das Abfräsen der Schraubenköpfe oder das Aufbohren der Schrauben, evaluiert. Der Einsatz von zerstörenden Trennverfahren bei Schrauben wird erst dann empfohlen, wenn die Schrauben nicht mit zerstörungsfreien Verfahren gelöst werden können. In diesem Fall wird der Einsatz eines Trennschleifers oder Kernbohrers nahegelegt. Auch in (Zahedi et al. 2016) wurden unterschiedliche

zerstörende Trennverfahren bei der teilzerstörenden Demontage von Nietverbindungen an Horizontalstabilisatoren eines Flugzeugs verglichen. Im Fokus stehen die Trennverfahren Schleifen, Tiefbohren sowie Minimalbohren (Bohren eines flachen Loches in die Nieten mit anschließendem Aufbrechen der Verbindung) mit jeweils definierten Prozessparametern. Das Ergebnis ist ein Vergleich der Verfahren hinsichtlich der erforderlichen Kräfte beim Trennen. Hierzu wird der Disassembly Difficulty Calculator (DDC) eingeführt, welcher durch die Summe der einzelnen Kraftkomponenten in Verbindung mit dem eingesetzten Trennverfahren berechnet wird. Der höchste Aufwand zeigt sich beim Tiefbohren mit einem DDC von 23,6 kN, der geringste DDC (5,3 kN) ist beim Minimalbohren zu verzeichnen. In (Li et al. 2014) wird lediglich die Dauer unterschiedlicher Trennprozesse, darunter das Fräsen, bei der Demontage von elektronischen Steuergeräten (ECU) verglichen.

Eine **Eingrenzung des Prozessparameterraums** ist in (Kim et al. 2022) zu finden. In dieser Untersuchung werden optimale Parameter beim Laserschneiden mit Prozessgas unter Wasser experimentell bestimmt. Das Ziel war die Ermittlung der besten Schnittqualität bei einem fixen Abstand mit Variation der Laserleistung.

(Chen et al. 2020) führt ein **Prozessmonitoring** zur Detektion von Fehlern während des Trennprozesses durch, wobei ggf. alternative Prozessrouten vorgeschlagen werden. Eine Adaption der Prozessparameter findet nicht statt. (Karlsson & Järrhed 2000) stellen ein Beispiel für eine Arbeit zur **Prozessregelung** bei zerstörenden Trennverfahren dar. In dieser werden kraftbasiert Schraubenköpfe von Waschmaschinen-Motoren mithilfe einer pneumatischen Bohrmaschine aufgebohrt.

Eine systematische Untersuchung der **Wechselwirkung** zwischen Prozess und Produkt ist in keiner der aufgelisteten Arbeiten klar ersichtlich. In (Chen et al. 2020) wurde lediglich der schmelzende Kunststoff angemerkt, welcher zu Verstopfungen führen kann. Es finden jedoch keine näheren Untersuchungen statt, unter welchen Umständen es dazu kommt und wie dies vermieden werden kann. (Kampker et al. 2020) weist bei der Demontage von Lithium-Ionen-Batteriemodulen (Laserschneiden der Busbars sowie des Modulgehäuses) auf den kritischen Einfluss des Schneidprozesses auf die Batteriezellen hin. Dabei wird angemerkt, dass die Temperatur am Zellgehäuse sowie mechanische Kräfte am Zellterminal untersucht werden können. Eine Untersuchung der Fragestellung selbst findet jedoch nicht statt.

Zusammenfassung

In mehreren Forschungsarbeiten wurden die Trennverfahren Schleifen, Bohren, Fräsen, Scherschneiden sowie Laserschneiden erfolgreich an diversen Demontageobjekten qualifiziert. Sieben von zehn der identifizierten Forschungsarbeiten setzen auf spanende Trennverfahren, was auf deren verbreiteten Einsatz in der Forschung hinweist. In einigen Arbeiten wurden Trennverfahren miteinander verglichen, z. B. beim Lösen von Schraub- oder bei Nietverbindungen. Eine Eingrenzung des Parameterraums wurde beim Laserschneiden vorgenommen. Prozessmonitoring und -regelung waren jeweils in einer Arbeit zu verzeichnen. Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen Prozess und Produkt wurden nicht durchgeführt. Es wurde lediglich auf den aufschmelzenden Kunststoff oder den kritischen Einfluss des Schneidprozesses auf die Batteriezelle hingewiesen.

Forschungsdefizit bei spanenden Trennverfahren

Der Anwendungsfall „Trennen der Zellkontaktierungen“ erfordert den Einsatz von (teil-) zerstörenden Verfahren unter Berücksichtigung der produktspezifischen Randbedingungen, bedingt durch die Gefahren der Lithium-Ionen-Zellen. Spanende Verfahren wurden in vielen Anwendungsfällen untersucht, sind jedoch mit hohen Kraftentwicklungen verbunden.

Keine der gelisteten Forschungsarbeiten berücksichtigt beim Trennprozess die produktspezifischen Randbedingungen, insbesondere die Gefahren, obwohl dies beispielsweise in (Kampker et al. 2020) als notwendig erachtet wird. Die zahlreichen Gefahren, ausgehend von den Lithium-Ionen-Zellen, erfordern hingegen eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen Trennprozess und Produkt. Zudem konnten keine Arbeiten identifiziert werden, die den Einsatz spanender Verfahren bei der Demontage von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien untersuchen, sodass ein relevanter Bereich bislang unberücksichtigt bleibt.

2.3 Demontagesystem und -planung

Das folgende Kapitel gibt die Grundlagen zu flexiblen Demontagesystemen wieder. Weiterhin wird auf die Demontageplanung eingegangen und es werden Forschungsarbeiten zur CAD-basierten Demontageplanung vorgestellt.

2.3.1 Aufbau eines flexiblen, automatisierten Demontagesystems

Ein beispielhafter Aufbau eines flexiblen, automatisierten Demontagesystems ist in Abbildung 2–5 illustriert.

Elementare Bestandteile eines flexiblen Demontagesystems nach (Fleischer et al. 2021; Vongbunyong & Chen 2015) sind:

- **Kinematik** (vorwiegend 6-Achs-Knickarmroboter aufgrund der Flexibilität) zum Ausführen von Bewegungen
- **Endeffektoren** (2-Finger-/Vakuum-Greifer, Frässpindel, Schraubautomat ...) als Funktionswerkzeug mit **Werkzeugwechselsystem** sowie **-magazin**
- **Spannsystem** (pneumatisch, magnetisch ...) zum Fixieren des Werkstücks
- **Sensorsysteme** (z. B. Thermografiekamera, (3D-)Kamerasystem) zur sensorbasierten Zustandserfassung innerhalb der Anlage
- **Anlagensteuerung** zur Steuerung der Anlage und der Subsysteme
- **Sicherheitssystem** (Sicherheitszaun, Lichtschranke, Notausschalter ...) zur Sicherstellung der Maschinen- und Personensicherheit
- **Logistiksystem** (Transportsystem, Lager ...) für die Förderung und Speicherung von Werkstücken und Materialien

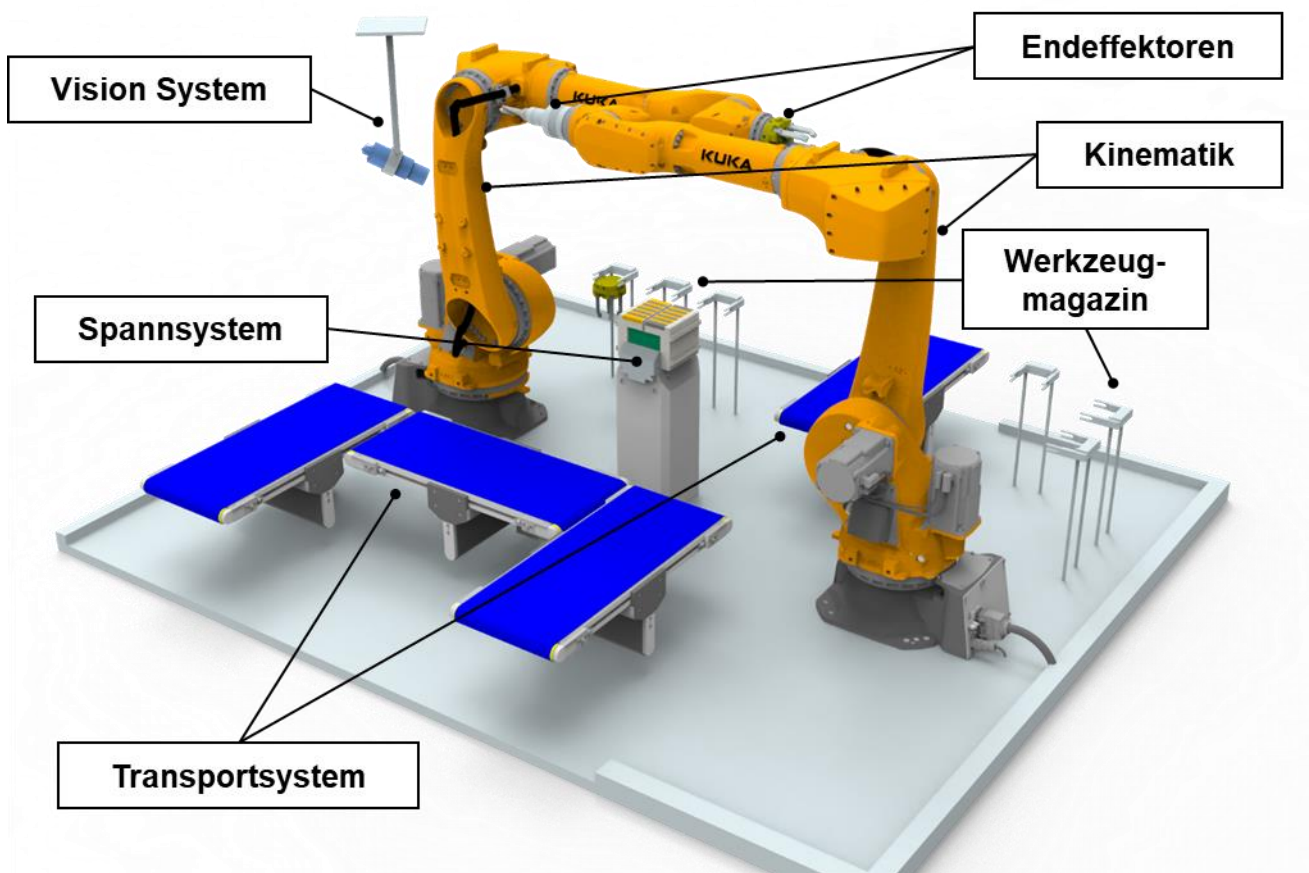


Abbildung 2–5: Physischer Aufbau eines flexiblen Demontagesystems in Anlehnung an (Fleischer et al. 2021)

Eine Übersicht über Forschungsarbeiten mit umgesetzten flexiblen Demontagesystemen für diverse Demontageobjekte ist in Tabelle 2-4 ersichtlich. In den aufgezeigten Arbeiten finden sich größtenteils die Bestandteile Kinematik, Endeffektoren (Greifer, Trennwerkzeug), Werkzeugwechselsystem sowie -magazin und Spannsystem wieder. Bei der Kinematik wird vorwiegend auf den 6-Achs-Knickarmroboter gesetzt. Statt eines Werkzeugwechselsystems kann alternativ auch ein multifunktionaler Endeffektor wie bei (Chen et al. 2020) zum Einsatz kommen.

Flexible Demontagesysteme werden bereits im industriellen Umfeld in verschiedenen Bereichen verwendet, wie zur Demontage von Apple iPhones sowie für die Demontage von Fernsehgeräten bei Veolia. Auch hier stellen 6-Achs-Knickarmroboter mit unterschiedlichen Werkzeugen und Greifer (2-Fingergreifer) elementare Bestandteile dar. (Bogue 2019)

Tabelle 2-4: Forschungsarbeiten mit umgesetzten flexiblen Demontagesystemen

Arbeit	Kinematik	Spannsystem	Werkzeugwechsler	Trennwerkzeug	Greifer
(Chen et al. 2020; Vongbunyong & Chen 2015)	ABB IRB140 (6A*)	x	-	x	-
(Basdere & Seliger 2003; Uhlmann et al. 2001)	k. A. (6A*)	x	x	x	x
(Bailey-Van Kuren 2006)	k. A. (6A*)	x	-	x	x
(Hohm et al. 2000)	PUMA (6A*)	-	-	x	x
(Huang et al. 2021b)	KUKA LBR iiwa 14 R820 (7A*)	x	-	x	x
(Kernbaum et al. 2009)	k. A. (SCARA)	x	-	x	x
(Kopacek & Kopacek 2006)	k. A. (6A*)	x	x	x	x
(Li et al. 2014)	Stäubli RX160 (6A*)	x	x	x	x
(Poschmann et al. 2021)	KUKA LBR iiwa 14 R820 (7A*)	-	-	x	-
(Gil et al. 2007; Torres et al. 2009)	Mitsubishi PA-10 (7A*), Intelteks SCORBOT ER-IX (5A*)	x	x	x	x

k. A. = keine Angabe, 5A*/6A*/7A* = 5/6/7-Achs-Knickarmroboter

Eine Nutzwertanalyse (NWA) für die vier wichtigsten Industrieroboter wurde anhand der Kriterien Zugänglichkeit, Arbeitsraum, Genauigkeit, Dynamik sowie Traglast durchgeführt. Ein Vergleich der Roboter hinsichtlich dieser Kriterien ist in Tabelle 2-5 dargestellt. Die genannten Kriterien wurden gezielt im Hinblick auf die automatisierte Demontage von Lithium-Ionen-Batteriemodulen gewichtet.

Aus der NWA geht eindeutig hervor, dass der Knickarmroboter die Anforderungen am besten erfüllt. Sein großer Arbeitsraum bei gleichzeitig geringem Platzbedarf und die hohe Zugänglichkeit der Werkzeugspitze (engl.: Tool-Center-Point, kurz TCP) machen ihn gegenüber anderen Kinematiken (z. B. SCARA, Portal- oder Parallelkinematik wie beim Delta-Roboter) besonders geeignet. Diese Eigenschaften sind bei einer flexiblen Demontage von unterschiedlich großen Objekten mit variabel angeordneten Fügeverbindungen von erheblichem Vorteil.

Tabelle 2-5: Nutzwertanalyse der vier wichtigsten Industrieroboter in Anlehnung an (Pott & Dietz 2019)

	Ge- wicht	Knickarmro- boter (A)		SCARA-Ro- boter (A)		(Flächen)- Portal (A)		Delta-Robo- ter (B)	
		(*)	(**)	(*)	(**)	(*)	(**)	(*)	(**)
Zugänglichkeit	7	++	14	0	0	0	0	0	0
Arbeitsraum	4	+	4	0	0	++	8	0	0
Genauigkeit	7	+	7	+	7	+	7	++	14
Dynamik	2	+	2	+	2	+	2	++	4
Traglast	0	+	0	0	0	++	0	0	0
SUMME			27		9		17		18

(A) serielle Kinematik, (B) parallele Kinematik, (*) einzeln, (**) gewichtet

Ein Knickarmroboter besteht aus einer kinematischen Kette an Segmenten, die auch als Arme bezeichnet werden und mit Drehgelenken miteinander verbunden sind. Die Gelenke bilden jeweils die Freiheitsgrade ab. Der Roboterfuß bzw. die -basis ist mit der Umgebung (Wand, Boden, Decke) mechanisch verbunden. Die Segmente werden durch Servomotoren an den Gelenken positioniert bzw. bewegt. Die Gelenkwinkelstellung (Gelenkkordinaten q) definiert im kartesischen Raum (Weltkoordinaten p) die Position und Orientierung des TCP. Die Transformation zwischen beiden Koordinatensystemen erfolgt mithilfe der direkten Kinematik (q zu p) oder inversen Kinematik (p zu q). (Pott & Dietz 2019; Weber 2019)

Nachteilig bei einem Knickarmroboter ist das ungünstige Nachgiebigkeitsverhalten, das um ein bis zwei Größenordnungen höher liegt als bei einer Werkzeugmaschine. Zudem ist die Nachgiebigkeit stark abhängig von der Gelenkwinkelstellung. Die Nachgiebigkeit stellt insbesondere bei Prozessen mit höheren Kräften eine Herausforderung dar, da durch das ungünstige Nachgiebigkeitsverhalten des Roboters eine (statische) Verschiebung der Werkzeugbahn sowie eine Niederfrequenzschwingung der gesamten Roboterstruktur zu beobachten sind. (Karim et al. 2018) konnten z. B. eine maximale Nachgiebigkeit C im Bereich von 1,5 mm/kN messen. Die Nachgiebigkeit lässt sich insbesondere auf die Getriebebox (nach dem Motor am Gelenk) und auf die dünne und seriell-verschaltete Roboterstruktur zurückführen. (Karim et al. 2018; Pott & Dietz 2019)

Ein weiterer Nachteil bei Knickarmrobotern stellt die Singularität dar. Diese bezeichnet ungünstige Gelenkstellungen, bei der bestimmte Bewegungsrichtungen verhindert werden und somit geplante Roboterbewegungen nicht umgesetzt werden können. In der Nähe von Singularitäten sind Verlangsamungen der Endeffektor-Bewegung und gleichzeitig hohe Beschleunigungen der Drehachsen zu beobachten. Im schlimmsten Fall kommt der ausgeführte Fertigungsprozess zum Erliegen. Die Lage der Singularitäten ist bei Robotern mit der gleichen kinematischen Kette und Größe bekannt. (Pott & Dietz 2019)

Bei Nutzlastrobotern über 60 kg kann von Posengenaugigkeiten AP bis 2 mm und Bahn-genaugigkeiten AT bis 2,2 mm ausgegangen werden (Bongardt 2003). Als Haupteinflussfaktoren auf die Genauigkeit von Industrierobotern sind betriebsbedingte Einflussfaktoren zu nennen, wie Abweichungen der Betriebstemperatur, Krafteinflüsse auf die Roboterstruktur und Vibrationen (Bongardt 2003; Gräser 1999). Die Genauigkeitssteigerung kann gemäß (Puzik 2011) mittels Kalibrierungs- und Kompensationsmaßnahmen erfolgen. In diesem Zusammenhang sind Arbeiten von (Bongardt 2003; Puzik 2011; Rösch 2014; Wollnack 2001) zu nennen. Die Steigerung setzt jedoch zusätzliche Sensorik, wie Lasertracker, und/oder Aktorik wie Piezo-Aktorik voraus, was mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Bei einer wirtschaftlichen Demontage ist auf zusätzliche Sensorik möglichst zu verzichten. Bei Demontageprozessen können im Vergleich zu konventionellen Fertigungs- und Montageprozessen, welche teilweise im μm -Bereich liegen, höhere Toleranzen bzw. Ungenauigkeiten im Bereich von mehreren mm in Kauf genommen werden (Vongbunyong & Chen 2015).

Nach (Foo et al. 2022) können Demontagesysteme in sieben Stufen der Automatisierung (engl.: Levels of Automation, kurz LoA) eingeordnet werden. Dabei wird zwischen mechanisierten und computerisierten LoA unterschieden. Aus Kosten- und Sicherheitsgründen, was auf die Batteriemoduldemontage vor allem wegen den gefährlichen Lithium-Ionen-Zellen zutrifft, ist ein hoher LoA, insbesondere der mechanisierte LoA, anzustreben. Mindestens Level 6 sollte erreicht werden, bei dem eine flexible Maschine vorliegt und nur die Rekonfiguration manuell erfolgt. Ein hoher computerisierter LoA erfordert eine möglichst automatisierte bzw. autonome Demontageplanung unter Berücksichtigung des durch Sensoren erfassten Zustands innerhalb der Demontageanlage mit anschließender Steuerungscodegenerierung. Auf die Demontageplanung mit Fokus auf dem flexiblen Trennen der Zellkontaktierungen bei Batteriemodulen wird nachfolgend näher eingegangen.

2.3.2 Demontageplanung

Die Demontagesequenzplanung (engl.: Disassembly Sequenz Planning, kurz DSP), ein Teilgebiet der Demontageplanung, beschäftigt sich nach (Vongbunyong & Chen 2015) mit der Planung der optimalen Abfolge der Demontageschritte, wie z. B. dem Lösen von Fügeverbindungen. Ausgangslage ist das vollständige Produkt, aus welchem alle gewünschten Komponenten extrahiert werden. Bei der DSP existieren Ansätze wie mathematische Programmierung, heuristische Methoden wie bei (Gungor & Gupta 1998), KI-Methoden wie der Ameisenalgorithmus (Shan et al. 2007) oder adaptive Planer mittels Fuzzy-Petrinetzen (Tang 2009). Die DSP setzt das Vorwissen über die Produktstruktur z. B. in Form von Computer-Aided Design (CAD)-Modellen voraus.

Die Demontage von Batteriemodulen ist, wie bereits in Kapitel 2.1.4.1 dargestellt, geprägt durch eine überschaubare Anzahl an Demontageschritten, die in ihrer Abfolge meist durch die Produktstruktur vorgegeben sind. Gezeigte Ansätze sind daher eher für Traktionsmotoren mit deutlich mehr Bauteilen und folglich höherer Anzahl an möglichen Demontageabfolgen vorgesehen und für die Demontage von Batteriemodulen nicht unbedingt erforderlich. Beim vorliegenden Anwendungsfall *Trennen der Zellkontaktierungen* handelt es sich um ein Problem der Erzeugung von Werkzeugbahnen für ein bekanntes Werkzeug mit definierten Prozessparametern. Die Planung setzt wie bei den üblichen DSP-Ansätzen die Kenntnisse über die Produktstruktur z. B. in Form von CAD-Modellen voraus.

CAD bezeichnet nach (Lutters 2018) den Einsatz von vielfältigen, computergestützten Werkzeugen als Unterstützung u. a. für Ingenieure, insbesondere bei der Erstellung von Geometriemodellen. Bei 3D-CAD-Modellen wird zwischen den Repräsentationsformen Drahtmodelle, Flächenmodelle sowie Volumenmodelle unterschieden. Zu letzteren zählen CSG-Modelle (Constructive Solid Geometry), welche komplexe Volumenkörper durch Verknüpfung mittels boolescher Operationen von einfachen Grundvolumina, wie Quader oder Zylinder, abbilden. B-Rep-Modelle (Boundary Representation), als weitere Volumenmodelle, definieren den Volumenkörper durch begrenzende Flächen und Kanten. Diese liegen entweder in Form von analytischen Flächen/Kurven oder Freiformflächen/-kurven vor. Beide Ansätze können miteinander kombiniert werden; dies wird als hybrides Modell bezeichnet. (Vajna et al. 2009)

Einen großen Nachteil stellt die allgemein mangelnde Verfügbarkeit der CAD-Modelle von Demontageobjekten dar (Vongbunyong & Chen 2015). Nachfolgend wird jedoch

vom Szenario ausgegangen, dass ein CAD-Modell vorliegt. Dies kann der Fall sein, falls die automatisierte Demontage durch den Hersteller der Batterien erfolgt, welcher gleichzeitig oft der Produktentwickler mit Zugang zur CAD-Datei ist. Der Hersteller als Inverkehrbringer ist nach § 2 Abs.15 BattG verantwortlich für das Sammeln und Verwerten der Batterien, worunter die Demontage fällt.

Nachfolgend werden Forschungsarbeiten zur automatisierten Demontageplanung auf der Basis von CAD-Daten vorgestellt.

2.3.3 Forschungsarbeiten zur automatisierten Demontageplanung

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert, ist für die Demontageplanung die Kenntnis über die Produktstruktur erforderlich. Forschungsarbeiten wie (Hohm et al. 2000; Karlsson & Järrhed 2000; Kopacek & Kopacek 2006; Poschmann et al. 2021; Vongbunyong & Chen 2015) nutzen für die Demontageplanung Sensordaten in Kombination mit einer Datenbank zur Abbildung der Produktinformationen. Als Datenbank werden z. B. Ontologien (Vongbunyong & Chen 2015) oder generische Datenbanken zur Speicherung von Objektprototypen mit Objektmerkmalen (Hohm et al. 2000) eingesetzt. Die Sensoren (insbesondere 2D- bzw. 3D-Kameras) kommen hauptsächlich zum Einsatz, um

- (1) Produkte zu identifizieren,
- (2) Komponenten zu identifizieren und
- (3) Komponenten zu lokalisieren.

Eine Abbildung oder Repräsentation der (vollständigen) Produktgeometrie in der Datenbank in Form von CAD-Daten liegen in den genannten Arbeiten dabei nicht vor.

(Emmanuel & Chinedu 2013; Imen et al. 2020; Issaoui et al. 2017; Prioli et al. 2022; Vyas & Rickli 2016; Yi et al. 2008) beschäftigen sich mit dem Thema Demontagesequenzplanung auf Basis von CAD-Daten. Diese Arbeiten zielen meist auf die Ermittlung der möglichen Abfolge von Demontageschritten in Form von beispielsweise Demontagevorrangmatrizen ab. Die Planung eines einzelnen Demontageschrittes (wie dies bei dem Trennen der Zellkontaktierungen der Fall ist) auf Basis einer CAD-Datei findet nicht statt. Zudem handelt es sich z. T. um theoretische Ansätze, die keine Validierung an konkreten Demontageobjekten mit praktischem Bezug vorweisen (vgl. (Vyas & Rickli 2016)).

Im vorhergehenden Abschnitt wurde bereits darauf hingewiesen, dass es sich beim Trennen der Zellkontaktierungen um ein Problem der Generierung von Werkzeugbahnen handelt. Ein nennenswerter Ansatz hierzu wird in (Vongbunyong & Chen 2015) vorgestellt: Die Sensoraufnahme wird in Form eines Farbbildes des Produktausschnitts, auf welchem ein Trennschnitt mithilfe eines Winkelschleifers erfolgen sollte, einem Benutzer auf einer grafischen Benutzeroberfläche (engl.: Graphic User Interface, kurz GUI) angezeigt. Der Benutzer zeichnet in der GUI definierte Trennschnitte ein, welche in einer Datenbank abgespeichert bzw. ausgeführt werden. Jedoch ist beim vorliegenden Anwendungsfall der genannte Ansatz aufgrund der sehr hohen Anzahl an Batteriemodulvarianten (bei jeder Variante ist die Benutzereingabe erforderlich) sowie der hohen Anzahl an Zellkontaktierungen nur bedingt geeignet. Daher stellt sich die Frage, ob eine automatisierte Extraktion von Stützpunkten auf Basis eines CAD-Modells, sofern dies vorliegt, eine effizientere Alternative sein könnte. Da in diesem Fall keine manuelle Eingabe durch einen Menschen erforderlich wäre, könnte dies eine wirtschaftlichere Lösung darstellen.

In (Bailey-Van Kuren 2006) liegt eine einfache Repräsentation der Geometrie des Produkts (Mobiltelefon) in Form eines Manifold-Oberflächenmodells vor. Für die sensorbasierte Erfassung kommt eine 3D-Kamera mit Streifenlichtprojektion zum Einsatz. Die Werkzeugpfadgenerierung findet auf Basis des Oberflächenmodells und dessen Mapping mit der 3D-Kameraaufnahme statt. Den Ausgangspunkt für die Ermittlung der Stützpunkte stellen vorliegende Produktmerkmale dar, wie z. B. die Seitennaht an einem Mobiltelefon. Der Ansatz zeigt jedoch bei Batteriemodulen eine begrenzte Eignung, da eindeutige Merkmale insbesondere bei Zellkontaktierungen nicht immer vorliegen. Zudem weisen Batteriemodule im Gegensatz zu Mobiltelefonen komplexere Oberflächenstrukturen auf, die durch einfache Manifold-Oberflächenmodelle nur bedingt abbildbar sind.

Außerhalb des Demontage-Kontextes lassen sich Arbeiten zur automatisierten Offline-Programmierung (AOLP) identifizieren. Die automatisierte Bestimmung von Schweißnahtpfaden auf Basis von CAD-Daten kommt im Rahmen der AOLP bereits im Bereich des Schweißens zur Anwendung. (Tran et al. 2023) führt eine AOLP-Prozesskette auf der Grundlage von Siemens NX und Python ein, welche in CAD-Daten Schweißnähte identifizieren und daraus Roboterpfade erzeugen kann. Neben der Schweißnahterkennung gehören die Erreichbarkeitsanalyse und Kollisionsüberprüfung zu den Themen

der genannten Arbeit. Die Erkennung wird regelbasiert anhand der Schnittlinien zwischen den geometrischen Körpern durchgeführt.

Kommerzielle Anwendungen wie RinasWeld™ können ebenso in CAD-Baugruppen Schweißnähte identifizieren. Die Nahtidentifikation findet ebenfalls anhand von Kanten statt, die sich aus berührenden Plattenoberflächen ergeben. Auf Basis der Kanten können Schweißpfade generiert werden. Die Software beinhaltet des Weiteren eine Datenbank mit Schweißparameter und -pfaden für unterschiedliche Schweißtypen und Materialien. (Wang et al. 2020)

Ansätze zur automatisierten Pfadgenerierung aus dem Bereich des Schweißens würden beim flexiblen Trennen von Zellkontaktierungen bei Batteriemodulen jedoch an ihre Grenzen stoßen. Die automatisierte Schweißnahterkennung findet aktuell anhand von klaren Merkmalen, wie Schnittlinien, statt, die bei der Zellkontaktierung nicht immer vorliegen bzw. stark variieren können.

Zusammenfassung

Aktuelle Arbeiten im Bereich der Demontageplanung nutzen einfache Sensordaten in Kombination mit einer Datenbank. Auch liegen Forschungsarbeiten zur Demontageplanung auf Basis von Produktgeometriemodellen, wie CAD-Daten, vor. Diese konzentrieren sich mehr auf die Gesamtabfolge der Demontageschritte, weniger auf einen Demontageschritt, was jedoch beim Trennen der Zellkontaktierungen der Fall ist.

Beim diesem Anwendungsfall handelt es sich vielmehr um ein Problem der Werkzeugpfadplanung. Arbeiten in diesem Kontext setzen Benutzereingaben voraus oder finden auf Basis von einfachen Manifold-Oberflächenmodellen statt und sind daher für den vorliegenden Anwendungsfall nur bedingt geeignet. Eine Automatisierung der Extraktion von geometrischen Informationen in Form von Stützpunkten zur Erzeugung von Werkzeugbahnen auf Basis einer CAD-Datei mit möglichst wenigen Benutzereingaben ist für Zellkontaktierungen angesichts der hohen Anzahl an Zellkontaktierungen sowie Batteriemodulvarianten jedoch sinnvoll.

Ansätze für die automatisierte Offline-Programmierung im Bereich des Schweißens sind aufgrund der erforderlichen klaren Merkmale in CAD-Modellen nicht anwendbar.

Forschungsdefizit bei automatisierter Demontageplanung

Das Trennen der Zellkontaktierungen bildet einen Demontageschritt in einer Reihe unterschiedlicher Demontageschritte. Das Kernproblem stellt bei diesem Anwendungsfall konkret die Planung der Werkzeugbahn dar. Bestehende Ansätze basieren auf Benutzereingaben oder einfachen Oberflächenmodellen und sind hierbei nicht wirtschaftlich nicht sinnvoll bzw. nur eingeschränkt geeignet.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die automatisierte Planung der Werkzeugbahn für Trennprozess auf Basis der CAD-Daten im Kontext der Demontage bisher nicht betrachtet wurde. Eine wirtschaftliche Lösung erfordert angesichts der hohen Variantenzahl eine weitestgehende automatisierte Bahnplanung ohne Benutzereingaben.

Zugleich soll für eine hohe Produktivität die Dauer des gesamten Trennvorgangs möglichst gering gehalten werden. Sofern mehrere offene Parameter (z. B. die Reihenfolge der Zellkontaktierungen) vorliegen, wird eine gesamtheitliche Optimierung nahegelegt.

2.4 Sensorbasierte Geometrieerfassung

Wie bereits in Kapitel 2.1.4.2 dargestellt, ist die sensorbasierte Erfassung bei der Demontage von verformungsbehafteten Lithium-Ionen-Batterie-Modulen unerlässlich. Zugleich existieren viele unterschiedliche Sensoren auf dem Markt. Nachfolgend liegt der Fokus auf den sogenannten 3D-Vision-Systemen zur visuellen Erfassung der 3D-Objektgeometrie. Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen zu 3D-Vision-Systemen dargelegt. Dabei werden Verfahren zur 3D-Geometrieerfassung, welche für den vorliegenden Anwendungsfall nur bedingt geeignet sind, systematisch ausgeschlossen. Zudem wird der Stand der Forschung und Technik zum kamerabasierten CAD-Abgleich unter Einsatz von 3D-Vision-Systemen dargestellt.

2.4.1 3D-Vision-Systeme

Bei der **Stereobildverarbeitung** wird mithilfe von zwei Kameras, welche nebeneinander angeordnet sind, von zwei geringfügig verschiedenen Positionen die Szene aufgenommen. Zur Anwendung des Triangulationsprinzips müssen korrespondierende Punkte in beiden Bildern vorliegen. Die Identifikation dieser Punkte erfolgt durch Vergleich der Texturen. Bei schwach texturierten Objekten (z. B. mit wenigen Farben) erweist sich die Suche nach Korrespondenzpunkten als schwer, was zu ungenauen

Auf dem Markt haben sich in letzter Zeit moderne 3D-Kamerasysteme auf Basis des Streifenlichtprojektionsverfahrens etabliert. Ein Ausschnitt der aktuell am Markt erhältlichen Systeme ist in Tabelle 2-6 aufgelistet. Bei den aufgeführten Systemen sind insbesondere die hohe Auflösung (Ebenen- sowie Tiefenauflösung) sowie die kurze Aufnahmedauer hervorzuheben, die für eine Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall sprechen.

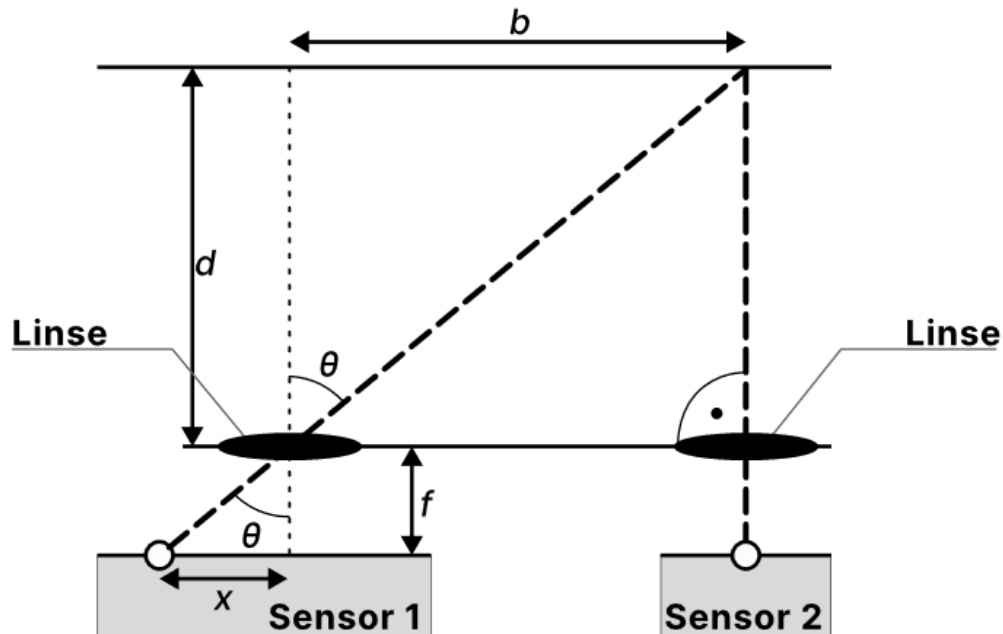


Abbildung 2–7: Visualisierung des Funktionsprinzips bei der Triangulation

Tabelle 2-6: Ausschnitt von marktverfügbaren 3D-Streifenlichtprojektionskameras

Bezeichnung	Messbereich [mm]	Arbeitsab- stand min. – max. (Fokus) [mm]	Genauigkeit [μm]	Aufnahme- dauer [s]
ZIVID Two M70 (siehe Anhang 11.3)	754 x 449 @0,7 m*	300 – 1300 (700)	~ 100 @0,7 m*	0,1 – 1
Photoneo PhoXi3DScanner M	590 x 404 @0,65 m*	458 – 1118 (650)	100	0,25 – 2,5
MechMind Log S	710 x 490 @1 m*	500 – 1000 (-)	100 – 200 @1 m*	0,3 – 0,5

* Angabe bezieht sich auf den Arbeitsabstand

Es existieren nach (Sackewitz 2014) weitere Verfahren zur 3D-Geometrieerfassung, welche nachfolgend vorgestellt werden. Diese weisen Einschränkungen auf und werden daher systematisch ausgeschlossen:

- **Deflektometrie** ist ein Verfahren, bei welchem durch Projektion eines Musters auf die spiegelnde Objektoberfläche und Erfassung des verzerrten, reflektierten Musters die räumliche Gestalt des Objekts bestimmt werden kann. Da dieses Verfahren eine spiegelnde Oberfläche voraussetzt, was beim vorliegenden Anwendungsfall meist nicht der Fall ist, wird das Verfahren nicht weiter betrachtet.
- **Time-of-Flight**-Verfahren (kurz ToF) nutzen unter der Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit die Messung der Lichtlaufzeit, um auf die Distanz zum Objekt zu schließen. Aus der Tiefeninformation wird die 3D-Kontur ermittelt. Bei kommerziellen ToF-Kameras liegt die Genauigkeit (Tiefenauflösung) bei > 5 mm, was beim vorliegenden Anwendungsfall zu hoch sein kann. Daher wird das ToF-Verfahren ausgeschlossen.
- Verfahren wie **Fokus-Variation**, **Chromatische konfokale Triangulation**, **Weißlichtinterferometrie**, **Digitale Holographie** sowie **Optische Kohärenztomographie** können aufgrund des begrenzten Messbereichs (bis wenige cm) ausgeschlossen werden.

Grundsätzlich wäre der Einsatz des Lichtschnittverfahrens in diesem Anwendungsfall möglich. Bei diesem Verfahren wird nach der Projektion einer Laserlinie auf ein Objekt aus dem reflektierten Signal mittels Triangulationsprinzip auf das Höhenprofil entlang der Laserlinie geschlossen. Die 3D-Informationen entstehen durch die Bewegung der Laserlinie oder des Objekts, was jedoch gegenüber dem 3D-Kamerasystem als Nachteil gilt, da dieses die gesamte Szene in einer einzigen Aufnahme erfasst. Letztendlich fällt die Wahl auf das 3D-Kamerasystem, da es eine schnellere Erfassung ermöglicht und eine weniger komplexe Mechanik erfordert.

Das Ausgabeformat bei 3D-Kameras auf Basis der Streifenlichtprojektion stellen geordnete dreidimensionale Punktwolken mit ggf. zusätzlichen Informationen, wie RGB-Farben oder Normalenvektoren, dar (Liu 2021). Die Transformation der Punktwolken – die Translation und Rotation – erfolgt durch Multiplikation mit homogenen 4×4 -Matrizen (Siciliano & Khatib 2016).

Übliche Operationen bei der Verarbeitung von Punktwolken nach (Liu 2021) sind:

- **Speicherung unter Nutzung von Datenstruktur:** Die effiziente Verarbeitung erfordert das Speichern der Punktwolke einschließlich der Informationen zu den Nachbarpunkten. Datenstrukturen wie *K-d tree* oder *Octree* unterteilen die Punktwolke in kleinere Bereiche, was das Durchsuchen stark vereinfacht.
- **Reduzierung der Punktwolkendichte:** Eine höhere Punktwolkendichte ist mit einer höheren Verarbeitungszeit verbunden. Unter Nutzung eines Voxelgitters, dem dreidimensionalen Äquivalent zu Pixelgittern, kann durch Bestimmung des zum Voxelmittelpunkt nächstgelegenen Punktes und Entfernen der restlichen Punkte die Punktwolkendichte reduziert werden.
- **Filterung:** Punktwolkenaufnahmen sind mit Rausch- und Ausreißerpunkten verbunden. Die beiden gängigsten Verfahren *radius outlier removal* und *statistical outlier removal* filtern Ausreißer auf Basis der Abstände zu den benachbarten Punkten.
- **Bestimmung der Oberflächennormalen:** Für die Bestimmung von Merkmalen, wie z. B. *Fast Point Feature Histograms* (kurz FPFH) nach (Rusu et al. 2009), die für die Registrierung erforderlich sind, wird die Kenntnis von Oberflächennormalen vorausgesetzt. Die Normalen können mithilfe der benachbarten Punkte bestimmt werden.

Zentrale Algorithmen zur Transformation von Punktwolken stellen Registrierungsalgorithmen dar. Es wird zwischen den beiden Varianten unterschieden:

- **Starre Registrierung:** Registrierungsalgorithmen werden zur Ausrichtung (Translation und Rotation) von mehreren Punktwolken zueinander eingesetzt, sodass eine möglichst hohe Überlappung der Punktwolken erreicht wird. Beispiele für solche Algorithmen sind der *Iterative Closest Point* (ICP) Algorithmus sowie merkmalsbasierte Algorithmen wie der *Random Sample Consensus* (RANSAC). Letzterer nutzt zur Suche nach korrespondierenden Punkten Merkmale wie *FPFH*. (Bustos & Chin 2018; Huang et al. 2021a)
- **Nicht-Starre Registrierung:** Im Gegensatz zur starren Registrierung, bei der das Objekt lediglich durch Translation und Rotation ausgerichtet wird, wird bei der nicht-starren Registrierung auch die Verformung geschätzt. Daher reicht eine homogene 4×4-Matrix zur Beschreibung der Punktwolke-Transformation nicht mehr aus, wie es bei der starren Registrierung der Fall wäre. Da für die nicht-

starre Registrierung jeder einzelne Punkt individuell betrachtet werden muss, ergibt sich ein deutlich größerer Lösungsraum, was zu einer höheren Komplexität des Registrierungsproblems führt. (Tam et al. 2013)

In der Robotik werden zur Beschreibung der Lage des Roboters und weiterer Komponenten im Raum Bezugssysteme in Form von kartesischen Koordinatensystemen (KOS) eingeführt (vgl. Abbildung 2–8). Als Basis für alle anderen KOS dient das unveränderliche Weltkoordinatensystem (Welt-KOS), welches seinen Ursprung in der Roboterbasis hat. Werkstückposition und -orientierung werden durch das Werkstückkoordinatensystem (Werkstück-KOS) definiert. Das Werkzeugkoordinatensystem ist im Tool-Center-Point (TCP) des Roboters platziert. Zudem können weitere Koordinatensysteme (wie eine Kamera) eingeführt werden. Der Wechsel zwischen den vorgestellten Bezugssystemen erfolgt mittels Transformationen (der Punktwolken). (Maier 2019)

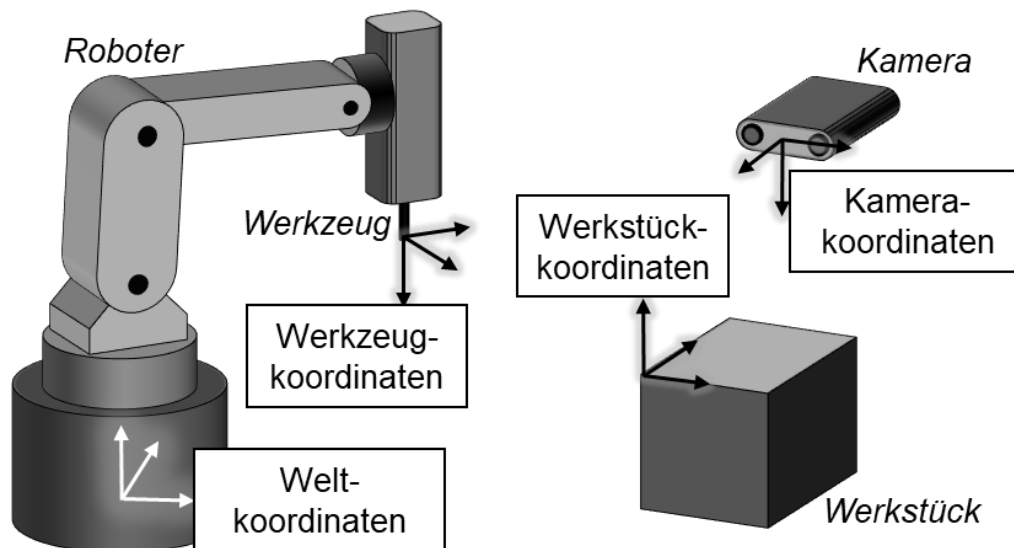


Abbildung 2–8: Darstellung der Koordinatensysteme in der Robotik in Anlehnung an (Maier 2019)

Zur Verwertung der Punktwolken, welche im Kamera-KOS aufgenommen werden, ist für diverse Roboterapplikationen (z. B. Anfahren von definierten Punkten) die Kenntnis über die Transformationsmatrix zwischen Welt-KOS und Kamera-KOS erforderlich. Hierzu ist eine **extrinsische Kalibrierung** durchzuführen. (Xie et al. 2014) Die extrinsische Kalibrierung kann z. B. mittels Hand-Eye-Kalibrierung nach (Horaud & Dornaika 1995) erfolgen.

Bei Kalibrierungsaufgaben kommen häufig Schachbrettmuster zum Einsatz, welche sich gut für die automatisierte Identifizierung und Lokalisierung von Punkten im Bild anhand der Kanten und Ecken eignen (Beyerer et al. 2016).

Wie bereits im Kapitel 2.3.2 angedeutet, kann die Demontageplanung auf Basis einer CAD-Datei erfolgen. Daraus können automatisiert essenzielle Positionen im Werkstück-KOS extrahiert werden, die für Trennoperationen während der Demontage erforderlich sind. In Kapitel 2.1.4.2 ist angemerkt, dass Batteriemodule mit geometrischen Unsicherheiten verbunden sind, was Sensorsysteme voraussetzt. In diesem Zusammenhang kann ein Abgleich der CAD-Datei, auf dessen Basis die Planung stattfindet, mit der 3D-Kameraaufnahme zielführend sein. Forschungsarbeiten zu diesem Thema im Bereich der Demontage werden nachfolgend vorgestellt.

2.4.2 Forschungsarbeiten zum kamerabasierten CAD-Abgleich

Es wird angemerkt, dass die erforderliche Verarbeitungshardware mit ausreichender Rechenleistung und -speicher erst in den letzten zehn Jahren für industrielle Anwendungen mit 3D-Vision-Systemen ausgereift ist. Daher sind die nachfolgend aufgeführten Arbeiten vorwiegend nach 2010 entstanden.

Im Zusammenhang mit der Demontage liegen Arbeiten zu Computer Vision (CV) mit 3D-Kamerasystemen und CV-Pipelines vor. Der Großteil der Arbeiten konzentriert sich auf die Objekterkennung und die Lokalisierung von Schrauben. Hierbei existieren unterschiedliche Ansätze:

- (1) Konturbasiert
z. B. (Büker et al. 2001)
- (2) Merkmalsbasiert (z. B. Haar Cascade)
z. B. (Vongbunyong & Chen 2015; Wegener et al. 2015)
- (3) Template-Matching
z. B. (ElSayed et al. 2012; Gil et al. 2007)
- (4) Deep-Learning (z. B. Mask R-CNN oder YOLO)
z. B. (Choux et al. 2021; Kalitsios et al. 2022; Mangold et al. 2022)

Der große Vorteil der oben genannten Ansätze ist, dass kein geometrisches Produktmodell benötigt wird, wie CAD-Daten des zu zerlegenden Objekts. Ein Nachteil ist aber zum einen, dass signifikante Merkmale (z. B. Konturen, Texturen) zur Erkennung der Komponenten benötigt werden (siehe (1), (2)). Nachteilig ist weiterhin, dass ein aufwendig erstellter Datensatz an Templates (3) oder Trainingsdatensatz (4) vorliegen muss, welcher zudem die Vielfalt des Verbindungstyps abbildet. Bei den genannten Ansätzen wurde gezeigt, dass diese nur auf eine Art von Verbindungen (insbesondere Schrauben) anwendbar sind, die Übertragbarkeit auf weitere Verbindungsarten ist

bislang nicht nachgewiesen. Die genannten Ansätze erweisen sich beim Trennen der Zellkontaktierungen nur als bedingt geeignet, da nicht immer signifikante Merkmale zur Erkennung und Lokalisierung vorliegen.

Für das Trennen von mechanischen, unlösbaren Fügeverbindungen (z. B. Schweißverbindungen am Gehäuse oder an der Zellkontaktierung) ist hingegen die genaue Kenntnis der Werkzeugbahn (in Form von Stützpunkten) auf der Oberfläche des realen Objekts (Batteriemodul) erforderlich. Hierbei handelt es sich um ein Problem der Generierung von Werkzeugbahnen auf der (strukturlosen) Objektoberfläche.

Konturbasierte Ansätze zur Pfaderzeugung, wie in (Uchiyama et al. 1999) präsentiert, bei denen Trennpfade anhand von Schlitzern extrahiert werden, sind nur bedingt geeignet, da signifikante Merkmale, wie Schlitze, erforderlich sind.

(Bailey-Van Kuren 2006) stellt einen Ansatz vor, bei dem eine einfache Repräsentation der Produktgeometrie in Form eines Manifold-Oberflächenmodells vorliegt. Auf Basis des Modells werden Stützpunkte für Werkzeugbahnen mithilfe der vorliegenden Produktmerkmale (z. B. Seitennaht am Mobiltelefon) ermittelt. Im Anschluss erfolgt ein Mapping des Oberflächenmodells inklusive der Stützpunkte mit der 3D-Kameraaufnahme, aufgenommen durch eine Streifenlichtprojektionskamera. Der Ansatz wurde am Beispiel eines Mobiltelefons validiert, ein flaches Objekt mit einfachen Produktgeometrien; die Anwendbarkeit auf andere Demontageobjekte ist nicht nachgewiesen. Zudem sind Mobiltelefone deutlich weniger durch geometrische Verformungen geprägt als Batteriemodule.

In (Zorn et al. 2022) kommen (starre) Registrierungsalgorithmen im Kontext der Demontage von Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz. In der genannten Arbeit wird versucht, einzelne Komponenten (hier BMS Slave Mounting) von Batterien mit starren Registrierungsansätzen global und lokal zu lokalisieren, um sie anschließend zu greifen. Verformungen der Komponenten werden dabei nicht berücksichtigt.

Die Demontage von Batteriemodulen, verbunden mit geometrischen Verformungen, erfordert hingegen Ansätze, welche die geometrischen Verformungen abbilden. Weiterhin müssen Stützpunkte für die Werkzeugbahn, die in der automatisierten, CAD-basierten Demontageplanung ermittelt werden, in der 3D-Kameraaufnahme lokalisiert werden. Eine Kette an Verarbeitungsschritten zum kamerabasierten Abgleich mit der CAD-Datei mit anschließender Punktlokalisierung ist somit erforderlich. Die spätere industrielle Umsetzung setzt für eine hohe Produktivität eine kurze Gesamtlaufzeit voraus. Da

einige Operationen rechenintensiv sind, ist die Wahl der passenden Verarbeitungsoperationen in der CV-Verarbeitungskette aus Effizienzgründen unabdingbar.

Zusammenfassung

Für die automatisierte Demontage bei Batteriemodulen ist eine sensorbasierte Geometrieerfassung unerlässlich, wofür sich 3D-Kamerasysteme besonders eignen. Herkömmliche Ansätze zur Objekterkennung und -lokalisierung sind für das Trennen der Zellkontaktierungen jedoch nur begrenzt geeignet, da hier nicht nur die Identifikation und Lokalisierung von Bauteilen erforderlich ist, sondern auch die Ermittlung präziser Werkzeugbahnen auf der Objektoberfläche.

Stützpunkte für Trennpfade lassen sich beispielsweise anhand signifikanter Merkmale (z. B. Schlitze) in der Kameraaufnahme bestimmen. Dies setzt jedoch voraus, dass solche Merkmale in ausreichender Anzahl und Qualität vorhanden sind. Alternativ können einfache Produktgeometriemodelle genutzt werden, um Stützpunkte für die Werkzeugbahn zu definieren. Bei Batteriemodulen sind diese Modelle jedoch aufgrund der komplexen Oberflächenstrukturen vermutlich nicht direkt anwendbar. In einer bestehenden Arbeit werden Komponenten durch einen kamerabasierten Abgleich mit einer CAD-Datei mittels starrer Registrierungsalgorithmen erfolgreich lokalisiert. Verformungen werden dabei jedoch nicht berücksichtigt.

Forschungsdefizit beim kamerabasierten Abgleich mit der CAD-Datei

Für ein sicheres Trennen der Zellkontaktierungen müssen die Verformungen der Lithium-Ionen-Batteriemodule bekannt sein. Diese können durch einen kamerabasierten Abgleich mit einer CAD-Datei, die das Referenzmodell repräsentiert, geschätzt werden. Hierfür sind 3D-Kamerasysteme geeignet.

In keiner der untersuchten Arbeiten wird die Verformung des Demontageobjekts durch einen kamerabasierten CAD-Abgleich berücksichtigt. Die bisherigen Ansätze waren für ihre jeweiligen Aufgaben ausreichend, da eine Verformungsschätzung dort nicht erforderlich war. Im vorliegenden Anwendungsfall ist diese jedoch essenziell.

Für eine spätere industrielle Umsetzung muss diese Operation in eine effiziente, automatisierte Computer-Vision-Verarbeitungskette eingebettet werden, die aufeinander abgestimmte Verarbeitungsschritte umfasst.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

3.1 Problemstellung und Zielsetzung

Effektives Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien erfordert die Demontage bis auf Zellebene. Hierzu müssen insbesondere die Zellkontaktierungen bei Batteriemodulen automatisiert und flexibel gelöst werden.

Da Zellkontaktierungen vorwiegend stoffschlüssig in Form einer Schweißverbindung vorliegen, sind (teil)zerstörende Trennverfahren erforderlich. Das Trennen der Zellkontaktierungen stellt aufgrund der unmittelbaren Nähe zu Lithium-Ionen-Zellen, der Gefahren durch die Zellen sowie des erforderlichen Einsatzes von (teil)zerstörenden Trennverfahren einen kritischen Prozessschritt dar. Spanende Verfahren werden als geeignet zum Trennen der Zellkontaktierungen eingestuft. ***Das Zerspanen als Trennverfahren bei der Demontage von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien wurde nach dem Stand der Forschung und Technik bisher weder systematisch untersucht noch durchgeführt. (A)***

Die vorliegende Variantenvielfalt bei Lithium-Ionen-Batteriemodulen erfordert ein Demontagesystem mit einem 6-Achs-Knickarmroboter, der eine hohe Flexibilität aufweist. Für eine wirtschaftliche Demontage wird ein beschleunigtes Einrichten des Demontagesystems beim Vorliegen einer neuen Produktvariante nahegelegt, die CAD-basierte Demontageplanung ist hierbei ein vielversprechender Ansatz. ***Ein Forschungsdefizit in diesem Bereich stellt die automatisierte Werkzeugbahnplanung auf Basis der CAD-Daten dar, die idealerweise ohne Benutzerinteraktion erfolgen sollte. (C)***

Eine sensorbasierte Erfassung der Produktgeometrie ist bei der Batteriemoduldemontage unter Anbetracht der geometrischen Verformungen der Module unabdingbar. In diversen Forschungsarbeiten zur automatisierten Demontage haben sich 3D-Kamerasysteme als geeignetes Sensorsystem erwiesen. ***Ein Forschungsdefizit beim kamerabasierten Abgleich mit CAD-Daten im Kontext der Demontage besteht in der Schätzung der Verformung des Demontageobjekts. Eine mögliche Lösung dafür sind nicht-starre Registrierungsalgorithmen, da sie im Gegensatz zu starren Algorithmen die Deformation des realen Objekts berücksichtigen. (B)***

Aus der Analyse des Produktes und dem Stand der Forschung und Technik lassen sich insbesondere folgende drei Forschungsfragen ableiten:

- (A) Welcher spanende Prozess kann für das Trennen der Zellkontaktierungen bei Batteriemodulen eingesetzt werden und welche Prozessparameter unter Berücksichtigung der produktspezifischen und kinematischen Randbedingungen eignen sich hierfür?
- (B) Wie sieht eine funktionsfähige, digitale Prozesskette für die visuelle Erfassung der geometrischen Verformung bei Batteriemodulen mithilfe eines 3D-Kamerasystems im industriellen Kontext aus?
- (C) Wie können automatisiert geometrische Stützpunkte für die Werkzeugbahn auf Basis einer CAD-Datei des Batteriemoduls identifiziert werden und wie ist die übergeordnete, digitale Prozesskette (ausgehend von der CAD-Datei bis zur Steuerungscodegenerierung) unter Einbeziehung der erfassten geometrischen Verformung sowie geeigneter Prozessparameter aufgebaut?

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Dissertation stellt das automatisierte und zugleich flexible Trennen der Zellkontaktierungen bei der Demontage von Lithium-Ionen-Batteriemodulen durch den Einsatz von spanenden Trennverfahren unter Berücksichtigung der geometrischen Produktverformungen in einer roboterbasierten Demontageanlage dar.

Vor diesem Hintergrund stellt das Zielbild dieser Arbeit eine integrierte, digitale Prozesskette dar, die ausgehend von der CAD-Datei und 3D-Aufnahmen des Batteriemoduls automatisiert einen Steuerungscode zum Trennen der Zellkontaktierungen in einer roboterbasierten Demontageanlage generiert. Die essenziellen Schritte dieser digitalen Prozesskette sind in Abbildung 3–1 skizziert.

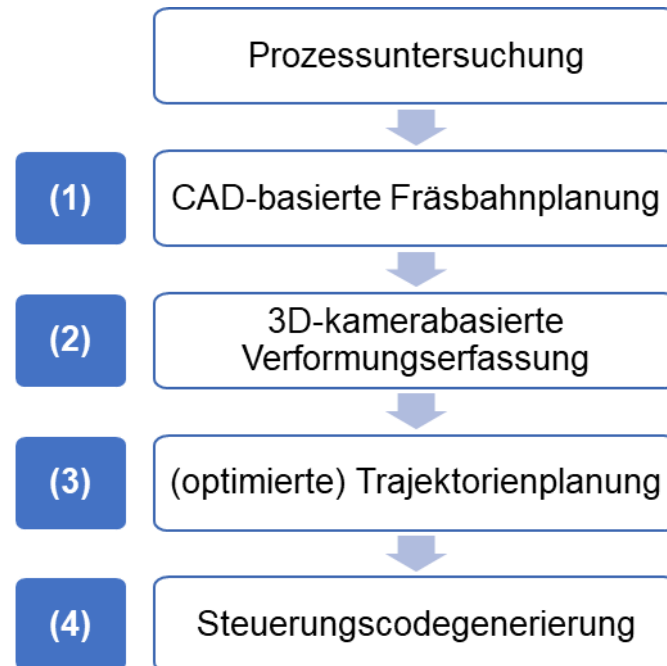


Abbildung 3–1: Essenzielle Schritte für das automatisierte und flexible Trennen der Zellkontaktierungen

Voraussetzung für die Prozesskette ist ein geeigneter und stabiler Trennprozess, der durch entsprechende Prozessuntersuchungen qualifiziert werden muss. Auf Basis einer digitalen Abbildung der Produktgeometrie in Form einer CAD-Datei wird zunächst eine Fräsbahnplanung durchgeführt und es werden automatisiert geometrische Stützpunkte ermittelt (1). Anschließend erfolgt die Erfassung der Produktgeometrie sowie ihrer Verformung mithilfe einer 3D-Kamera und eines Drehtisches, um die ermittelten Stützstellen im realen Raum unter Berücksichtigung der Verformung zu lokalisieren (2). Die lokalisierten Stützstellen dienen als Ausgangsbasis für die optimierte Trajektorienplanung des 6-Achs-Knickarmroboters (3). Die daraus resultierende optimale Trajektorie mündet im Anschluss in die automatisierte Generierung des Steuerungscode, der auf die Robotersteuerung übertragen und dort ausgeführt wird (4).

Die digitale Prozesskette soll exemplarisch in einer roboterbasierten Demontagezelle implementiert und validiert werden.

3.2 Vorgehensweise

Eine systematische Vorgehensweise zur Erfüllung der Zielsetzung wird in Abbildung 3–2 aufgezeigt.

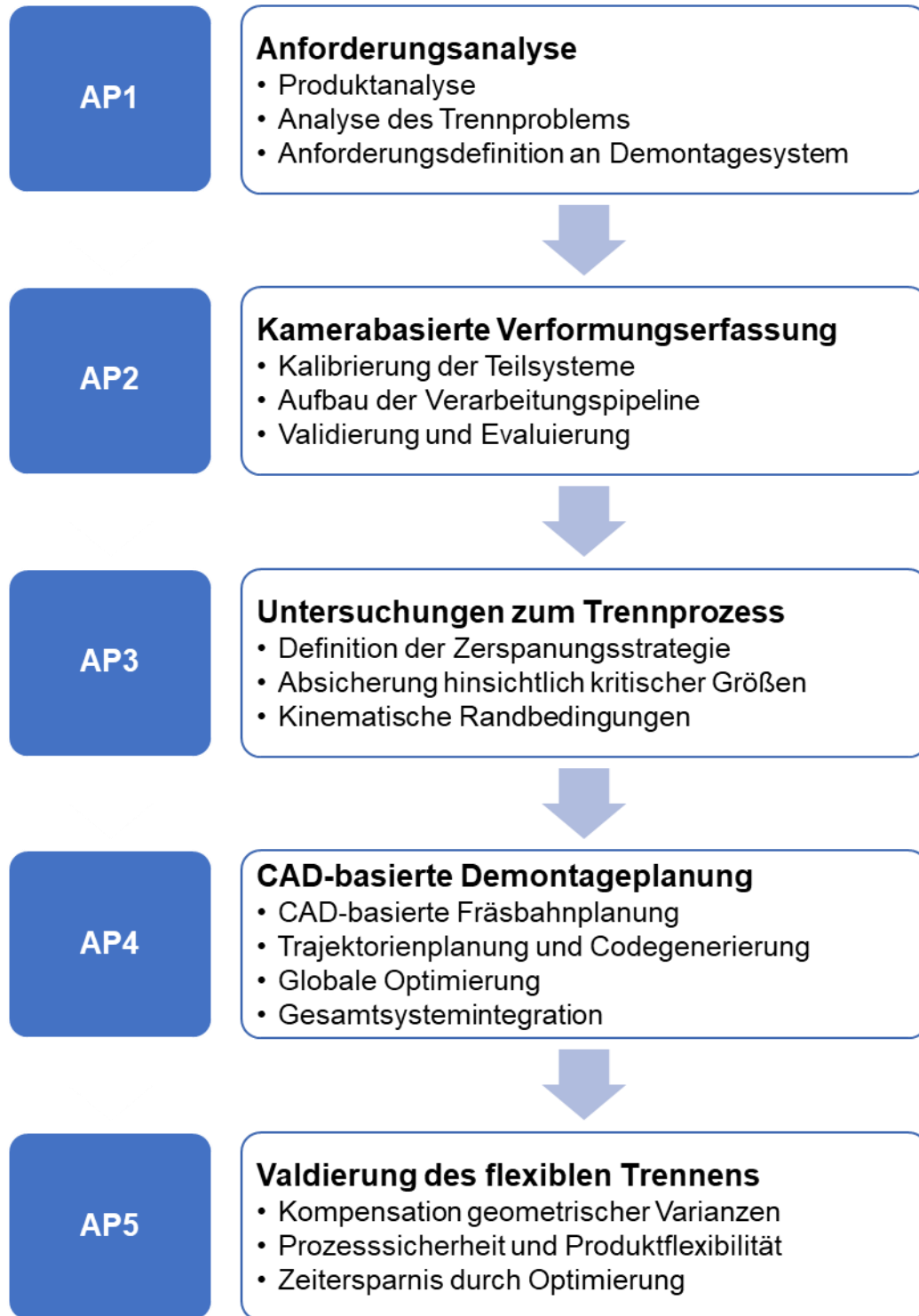


Abbildung 3–2: Vorgehensweise zur Erfüllung der Zielstellung

In Arbeitspaket (AP) 1 erfolgt eine Analyse der Anforderungen. Hierbei wird ausgehend von einer Analyse des Produktes sowie des Trennproblems eine Anforderungsliste an das Demontagesystem definiert.

AP2 adressiert die Verformungserfassung mit einer 3D-Kamera. Dabei wird zunächst eine Methodik zur Kalibrierung der vorliegenden Teilsysteme erarbeitet. Des Weiteren erfolgen der Aufbau der Verarbeitungspipeline und eine anschließende Validierung sowie deren quantitative Evaluierung.

In AP3 wird der Prozess zum Trennen der Zellkontaktierungen in Zusammenhang mit dem Produkt sowie der Kinematik qualifiziert. Dabei wird eine passende Zerspanungsstrategie definiert. Daraufhin findet eine empirische und modellbasierte Absicherung hinsichtlich kritischer, produktbezogener Größen statt. Im Anschluss werden die möglichen Randbedingungen und Einschränkungen durch die eingesetzte Kinematik betrachtet.

AP4 behandelt die Demontageplanung mit Fokus auf dem Trennen der Zellkontaktierungen auf Basis einer digitalen, geometrischen Abbildung des Produktes (in Form einer CAD-Datei). Dabei wird zunächst eine mögliche Methodik für die automatisierte, CAD-basierte Fräsbahnplanung erarbeitet, welche die Vorlage für die parametrisierte Trajektorienplanung und anschließende Codegenerierung ist. Weiterhin werden passende Optimierungsverfahren für das vorliegende Optimierungsproblem gegenübergestellt und bewertet. Im Anschluss kann eine Gesamtsystemintegration zu einer übergeordneten, digitalen Prozesskette erfolgen.

In AP5 wird das erarbeitete, integrierte Gesamtsystem im Hinblick auf das flexible Trennen der Zellkontaktierungen validiert. Dabei wird die Kompensation von künstlich eingebrachten geometrischen Verformungen aufgezeigt. Weiterhin werden die Prozesssicherheit und Variantenflexibilität untersucht. Anschließend wird durch den Einsatz von Optimierungsverfahren die Reduktion der Gesamtprozessdauer gezeigt.

Am Ende liegt ein flexibles Demontagesystem für Lithium-Ionen-Batteriemodule mit einem möglichst hohen Automatisierungsgrad vor. Dieses beinhaltet eine integrierte, digitale Prozesskette für das Trennen der Zellkontaktierungen bei Batteriemodulen mit hoher Variantenvielfalt unter Einsatz von spanenden Trennverfahren.

4 Anforderungsanalyse

Innerhalb des Kapitels wird eine Anforderungsanalyse hinsichtlich der vorliegenden Problemstellung durchgeführt. Hierfür werden das Produkt sowie das Trennproblem analysiert und darauf aufbauend Lösungsalternativen abgeleitet. Im Anschluss werden Anforderungen an das Demontagesystem definiert.

4.1 Produktanalyse

Für die Analyse des Produktes wird für eine geometrische Eingrenzung zunächst eine Marktanalyse von Lithium-Ionen-Zellen durchgeführt. Daraufhin werden der grundsätzliche topologische Aufbau von Batteriemodulen sowie der Aufbau der Zellkontaktierung beleuchtet. Anschließend erfolgen eine Einschätzung der geometrischen Verformung sowie eine Gefahrenanalyse durch Lithium-Ionen-Zellen.

4.1.1 Marktanalyse Zellen

Gemäß der Studie (Link et al. 2022) bieten elf der 16 bekanntesten Zellhersteller Lithium-Ionen-Zellen im prismatischen Zellformat zum Verkauf an, was gegenüber Pouchzellen (sieben von 16) sowie Rundzellen (zehn von 16) eine gewisse Marktdominanz mit sich bringt. Mit 78 Prozent beherrschen nach (Link et al. 2022) Zellen aus chinesischer Produktion den Markt, dominiert durch prismatische Zellen. Im europäischen Raum wird laut der Studie im Jahr 2030 die meiste Produktionskapazität für prismatische Zellen benötigt werden. Daher liegt der Fokus nachfolgender Betrachtungen auf Batteriemodule mit prismatischen Lithium-Ionen-Zellen.

Aus der Marktanalyse lassen sich für prismatische Zellen geometrische Kennwerte ableiten, welche die Geometrie von prismatischen Zellen annähernd vollständig beschreiben (siehe Tabelle 4-1). Die Kennwerte sind in Abbildung 4–1 illustriert. Zur Erfassung möglicher Zellformate wird die chinesische Norm (GB/T 34013) herangezogen. Die genannte Norm definiert mögliche Abmessungen von prismatischen Zellen und kann daher als marktnahe Referenz der Grenzwerte für die Zelldicke, -tiefe sowie -höhe betrachtet werden.

Angaben zur Zellpoltiefe, -dicke und -höhe sowie zum Zellpolabstand von auf dem Markt erhältlichen prismatischen Zellen sind in öffentlich zugänglichen Quellen nicht auffindbar und können daher nicht allgemein eingegrenzt werden. Als Arbeitsgrundlage

für die nachfolgende Betrachtung dient die prismatische Zelle CATL NMC 48Ah 3,7V (vgl. Anhang 11.7).

Tabelle 4-1: Geometrische Kennwerte und Wertebereich bei prismatischen Zellen

Geometrische Kennwerte	(GB/T 34013)	CATL NMC 48Ah 3,7V
Zelldicke z_b [mm]	12 – 86	26,22
Zelltiefe z_t [mm]	65 – 217	148,3
Zellhöhe z_h [mm]	80 – 396	91,7
Zellpoltiefe+/- p_{t+}/p_{t-} [mm]	k. A.	22,0
Zellpoldicke+/- p_{b+}/p_{b-} [mm]	k. A.	18,4
Zellpolhöhe p_h [mm]	k. A.	6,28
Zellpolabstand p_a [mm]	k. A.	114,6

k. A. = keine Angabe

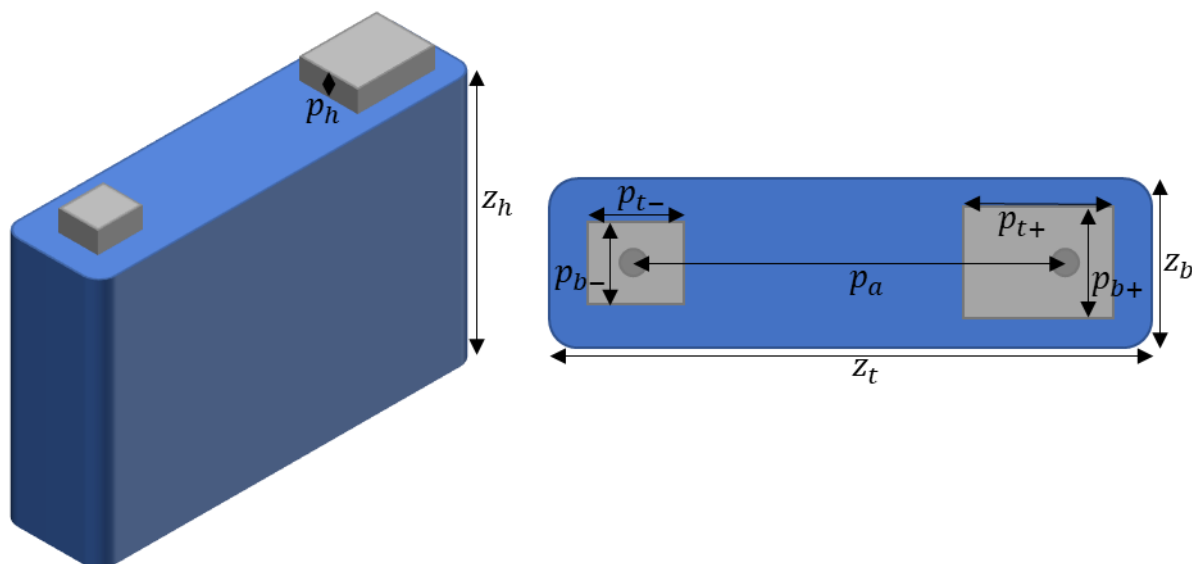


Abbildung 4-1: Visualisierung der geometrischen Kennwerte von prismatischen Zellen

Hierbei werden folgende Vereinfachungen getroffen, welche das vorliegende Trennproblem nicht beeinträchtigen:

- Vernachlässigung von Berstscheiben (Burst-Caps)
- Keine Rundungen/Vertiefungen
- Keine herausragenden Geometrien aus den Zellpolen (wie Gewindestifte als Fixierung der Busbars)
- Zellpole als minimale Erhebungen quaderförmig ausgeführt

4.1.2 Topologischer Aufbau eines Batteriemoduls

Eine umfassende Analyse zum Aufbau der verschiedenen Batteriemodulvarianten aus dem Stand der Technik wurde durchgeführt. Es wurden mögliche Komponentenausprägungen in Form eines morphologischen Kastens zusammengefasst. Sechs elementare Komponenten wurden identifiziert. Die Ergebnisse wurden in (Gerlitz et al. 2021a) publiziert und sind für Batteriemodule mit prismatischen Zellen in Abbildung 4–2 zusammengefasst dargestellt. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Komponenten Batteriezelle sowie Zellkontaktierung, die im Kapitel 4.1 näher beleuchtet werden. Für nähere Informationen über die anderen Komponenten wird auf die genannte Publikation verwiesen.

Komponenten		Eigenschaften	Manifestationen						
Batteriezelle	Anzahl Reihen		einreihig		zweireihig				
	Ableiterposition		----- Gleiche Seite						
Zellkontaktierung	Fügetechnik		Schweißverbindung		Verschraubung				
	Brücke		Zellverbindungselement*		Loch-Zellverbindungselement*				
	Trägerplatte		ja		keine				
Zellfixierung	Primärfixierung (Zelle zu Zelle)		<Klebeverbindung>						
	Sekundäre Fixierung (Zellgruppe)		Nicht-lösbar gefügte Seitenplatten		Lösbar gefügte Seitenplatten				
Modulgehäuse	Funktionsintegration mit Zellfixierung		ja		nein				
	Anzahl Einzelteile				einteilig		zweiteilig	mehrteilig	
	Verbindungsart der einzelnen Teile				Lösbar gefügt		Nicht-lösbar gefügt		
Thermo- management	Kühlarten		Luft		Flüssigkeit				
	Typen				Boden/ Kopf		Seite	Ableiter	Kühlplatte mit Flüssigkeit

< > optionales Element, * engl.: Busbar

Abbildung 4–2: Morphologischer Kasten für Batteriemodule mit prismatischen Zellen angelehnt an (Gerlitz et al. 2021a)

Insbesondere bei Batteriemodulen mit prismatischen Zellen lassen sich über die Modulvariante folgende Gemeinsamkeiten feststellen:

- Die Batteriemodule zeigen, bedingt durch die geforderte kompakte Bauweise, einen quaderförmigen Aufbau auf.
- Die prismatischen Zellen sind entweder ein- oder zweireihig gestapelt.
- Es existiert immer nur eine Hauptstapelachse. Der Zellstapel auf der Hauptstapelachse wird durch Endplatten abgeschlossen. Die Fläche, definiert durch die Endplatten, wird im Folgenden als Stirnfläche bezeichnet. Die Flächen orthogonal zur Hauptstapelachse werden als Mantelflächen definiert.
- Die Zellkontaktierungen befinden sich auf der Mantelfläche.
- Die Zellkontaktierung ist bei prismatischen Zellen entweder in geschweißter oder in geschraubter Form wiederzufinden.
- Die Stapelrichtung entspricht der Einspannrichtung.

Abbildung 4–3 veranschaulicht beispielhaft den Aufbau von ein- und zweireihigen Batterien. Darin sind zudem jeweils die Hauptstapelachse, das Batteriemodulgehäuse inklusive Endplatten sowie die einzelnen Batteriezellen mit den Zellkontaktierungen abgebildet.

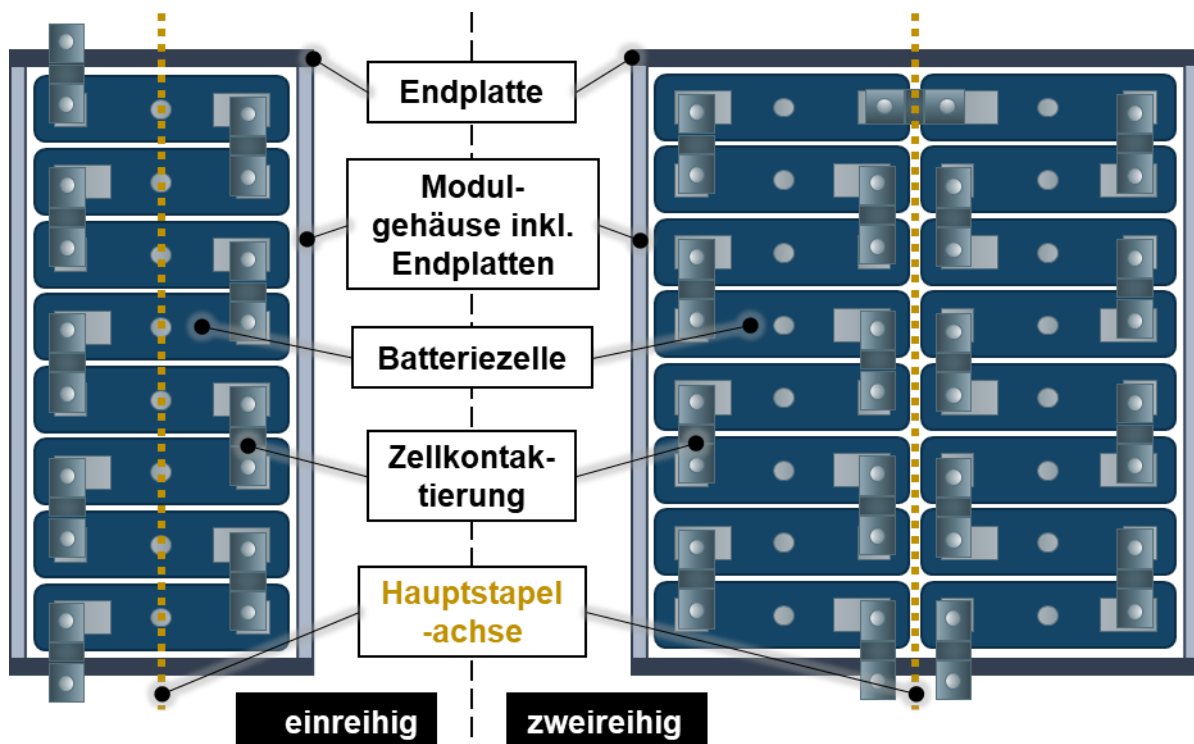


Abbildung 4–3: Beispielhafte Darstellung von ein- und zweireihigen Batteriemodulen

Für die nachfolgenden Betrachtungen werden folgende vereinfachende Annahmen hinsichtlich des topologischen Aufbaus des Batteriemoduls mit prismatischen Zellen getroffen:

- Gesamtanzahl Zellen: max. 12
- Anzahl Reihen: 1
- Anzahl paralleler elektrischer Verschaltungen der Zellen: 1

Das primäre Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung eines neuen Ansatzes zum automatisierten und flexiblen Trennen der Zellkontaktierungen mit anschließender Validierung anhand eines definierten Batteriemoduls mit verschiedener Zellanzahl. Da nicht alle Produktvarianten hierfür abgebildet werden müssen, ist die beschriebene Vereinfachung legitim.

4.1.3 Analyse der Zellkontaktierung

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben, stellt die Zellkontaktierung als elementare Komponente die elektrische Verbindung zwischen den Zellen sicher. Als Brücke kommt ein Zellverbindungselement (engl.: Busbar) zum Einsatz, welches stoffschlüssig mit den Zellpolen der benachbarten Zellen durch eine Schweißverbindung verbunden ist. Eine Trägerplatte kann als Montagehilfe zur Aufnahme der Busbars dienen. Gemäß (Das et al. 2019) kommt im Zusammenhang mit prismatischen Zellen das Laserschweißen als Schweißverfahren zum Einsatz. Der häufige Einsatz von Schweißverfahren bei Zellkontaktierungen ist auf die hohen Anforderungen an die Zellkontaktierung zurückzuführen (Das et al. 2019):

- Niedriger elektrischer Übergangswiderstand
- Hohe mechanische Festigkeit
- Chemische Beständigkeit
- Materialkompatibilität
- Niedrige Stückkosten wegen hoher Anzahl

Die hohen Anforderungen, vor allem der geforderte niedrige elektrische Übergangswiderstand, grenzen die Auswahl der möglichen Werkstoffe für das Zellverbindungselement (Busbar) stark ein. Die entsprechenden Werkstoffe nach (Das et al. 2019) sind in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Tabelle 4-2: Eingesetzte Werkstoffe für Busbars in Anlehnung an (Das et al. 2019)

	Aluminium (Alu99,5)	Kupfer (Cu-ETP)
Spezifikation	AW1050A-H14 [BS EN485]	CW004-H065 [BS EN 1652 (C101HH)]
Dicke [mm]	1,0; 1,5; 2,0; 2,5	1,0; 1,5; 2,0

In Elektrofahrzeugen, in denen das Gewicht eine entscheidende Rolle spielt, ist Aluminium gegenüber Kupfer als Werkstoff zu bevorzugen. Bei gleichem Gewicht weist Aluminium eine ca. 1,85-fach höhere elektrische Leitfähigkeit auf (Das et al. 2019; Pryor et al. 2008). Aus diesem Grund wird im Folgenden ausschließlich Aluminium der Spezifikation AW1050A als Werkstoff für die Busbars fokussiert.

(A_Auer&Biller 2022) ermitteln auf Basis einer Patentrecherche geometrische Kennwerte zur Beschreibung der Busbars, welche in aufgelistet Tabelle 4-3 und in Abbildung 4–4 illustriert sind.

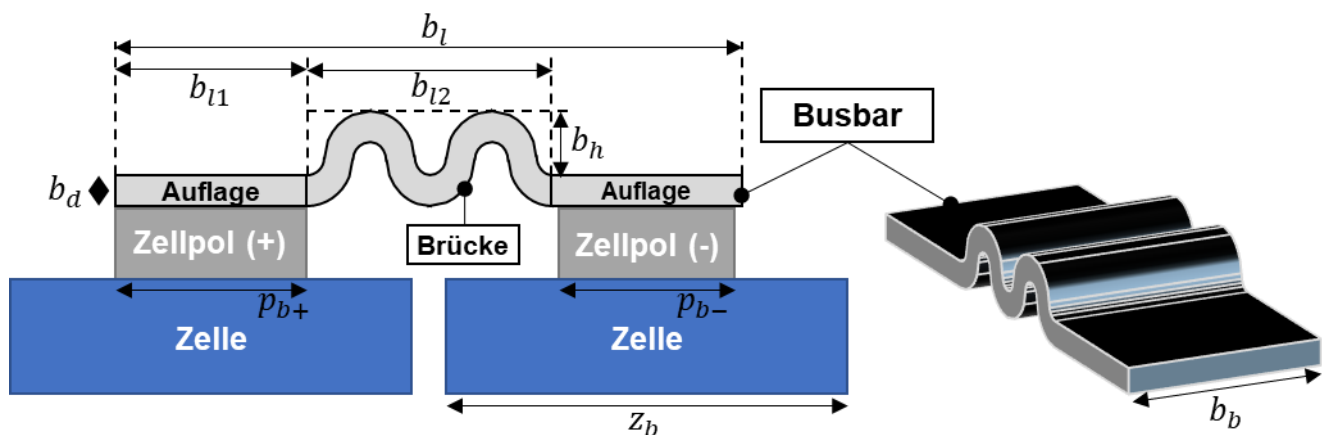


Abbildung 4–4: Visualisierung der geometrischen Kennwerte von Busbars in Anlehnung an (A_Auer & Biller 2022)

Tabelle 4-3: Geometrische Kennwerte von Busbars

Geometrische Kennwerte	Werte/Abhängigkeiten
Gesamtbreite b_b [mm]	$\leq p_{t+}$
Gesamtlänge b_l [mm]	$= z_b + p_{b+}$
Blechdicke b_d [mm]	{1,0; 1,5 ; 2,0; 2,5 } (Das et al. 2019)
Auflagenlänge b_{l1} [mm]	$= p_{b+}$
Brückenlänge b_{l2} [mm]	$= z_b - p_{b+}$

Brückenwellenhöhe b_h [mm]	0 – 6,5mm (A_Auer&Biller 2022)
Brückenwellenanzahl [-]	{0, 1, 2, 3} (A_Auer&Biller 2022)

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die englische Bezeichnung *Busbar* stellvertretend für das *Zellverbindungselement* durchgehend verwendet. Von folgenden Vereinfachungen beim Busbar wird in der vorliegenden Arbeit ausgegangen:

- Spiegelsymmetrischer Aufbau
- Vollmaterial
- Eine Blechschicht
- Verbindung von zwei Zellpolen (nur Reihenschaltung, keine Parallelschaltung)

4.1.4 Geometrische Verformung der Batteriezellen

Die Zellen unterliegen aufgrund unterschiedlicher Faktoren geometrischen Schwankungen, welche für automatisierte Trennprozesse in der Demontage eine Herausforderung darstellen. Die geometrische Schwankung äußert sich insbesondere in der Dickenänderung der Zellen, welche in Abbildung 4–5 dargestellt ist.

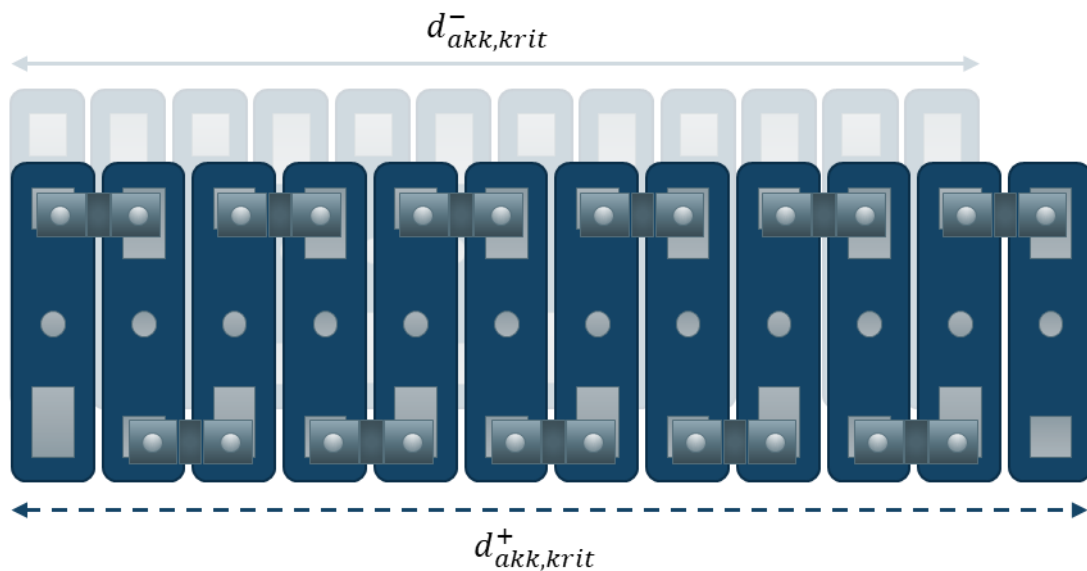


Abbildung 4–5: Veranschaulichung der akkumulierten Dickenänderung bei Lithium-Ionen-Batterien in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)

Hierbei ist klar, dass die kritische Dickenänderung der einzelnen Zellen $\Delta d_{i,krit} = (\Delta d_{i,krit}^{+} - \Delta d_{i,krit}^{-})$ im kritischsten Fall zur akkumulierten kritischen Dickenänderung

$\Delta d_{akk,krit} = d_{akk,krit}^+ - d_{akk,krit}^-$ entlang der Stapelrichtung der Zellen gemäß folgender Formel sich aufsummiert (n entspricht Anzahl Zellen):

$$\Delta d_{akk,krit} = \sum_{i=1}^n \Delta d_{i,krit} \quad 4-1$$

Als Ursachen für die Dickenschwankungen der Zellen können die folgenden Faktoren ausgemacht werden:

- Dickentoleranz der Zellen (technisches Datenblatt der Zelle)
- Atmungseffekt beim Laden/Entladen (Rieger et al. 2016)
- Atmungseffekt beim Tiefentladen (LI et al. 2008)

Eine Übersicht der relativen Dickenschwankungen prismatischer Lithium-Ionen-Zellen aus der Literatur ist in Tabelle 4-4 aufgeführt. Es konnten jedoch keine Quellen mit quantitativen Angaben zur Auswirkung der Dickenänderung prismatischer Zellen durch Tiefentladen gefunden werden. Die folgende Betrachtung dient dem Aufzeigen und einer groben Abschätzung der absoluten Dickenschwankung bei prismatischen Lithium-Ionen-Zellen. Für den Atmungseffekt beim Laden/Entladen wird der höchste bekannte Wert von 5,26 % (Lee et al. 2003) herangezogen.

Tabelle 4-4: Relative Dickenschwankungen bei prismatischen Lithium-Ionen-Zellen

Ursache	Quelle	Batterie	Relative Schwankungen
Dickentoleranz Zelle	Datenblatt (siehe Anhang 11.7)	CATL (Li-Ion NMC 48Ah 3,7V)	$\pm 1,14 \%$
Atmungseffekt Laden/Entladen	(Barker 1999)	(Li-Ion LCO 1,36Ah)	1,59 %
	(Lee et al. 2003)	(Li-Ion 0,55Ah)	5,26 %
	(Oh et al. 2014)	(Li-Ion NMC 5Ah)	1,50 %
	(Clerici et al. 2022)	(Li-Ion LFP 25Ah)	0,83 %

Eine Beispielrechnung in Tabelle 4-5 zeigt die Auswirkungen der Dickenschwankungen der Zellen auf das gesamte Batteriemodul mit folgender Konfiguration:

- Zellen: CATL NMC 48Ah 3,7V
- Anzahl Zellen (Verschaltungstopologie): 12 Zellen (12s1p)
- Abmessung einer Zelle (H x W x T): 91,7 x 148,3 x 26,22 mm³

Tabelle 4-5: Beispielrechnung zur Abschätzung der Dickenschwankungen

Ursache	1 Zelle	12 Zellen
Dickentoleranz	$\Delta d_{i,krit,1} = 0,598 \text{ mm}$	$\Delta d_{akk,krit,1} = 7,174 \text{ mm}$
Atmungseffekt Laden/Entladen	$\Delta d_{i,krit,3} = 1,379 \text{ mm}$	$\Delta d_{akk,krit,3} = 16,550 \text{ mm}$
SUMME	$\Delta d_{i,krit} = 1,977 \text{ mm}$	$\Delta d_{akk,krit} = 23,724 \text{ mm}$

Bei der gelisteten Batteriemodulkonfiguration liegt im kritischsten Fall eine akkumulierte Dickenänderung $\Delta d_{akk,krit}$ von **~23,7 mm (~ 7,5 %)** vor. Dies stellt im Extremfall auch die geometrische Verschiebung der äußersten beiden Zellkontaktierungen zueinander dar. Die aufgezeigte geometrische Verschiebung muss bei der Auslegung des Trennprozesses berücksichtigt werden. Gleichzeitig wird die Notwendigkeit der sensorbasierten Geometrieerfassung am Beispiel des Fräsens deutlich: Ohne genaue Positionskennntnis kann beim Fräsen im Extremfall ins Leere gefräst werden, wodurch die Fügeverbindung nicht prozesssicher getrennt wird.

(Sauerteig 2018) konnte systematisch die irreversible Dickenzunahme bei zyklischer Alterung einer Elektrode nachweisen. Zwecks Kompensation wird zum Platzieren von Moosgummi oder Schaumstoff zwischen den Zellen geraten. Auf diese Weise ist gemäß Autor das ideale Druckfenster für den optimalen Betrieb der Zellen sichergestellt. PORON EVExtend® Battery Pad Material¹ der Firma Rogers Corporation kann als markterhältliches Produkt zu diesem Zweck eingesetzt werden.

Zusätzlich zum Atmungseffekt können fertigungsbedingte Schwankungen der Komponenten im Batteriemodul sowie mögliche Deformationen während des Produktlebenszyklus bzw. während vorgelagerter Demontageprozesse weitere Einflussquellen sein, die ebenfalls geometrische Schwankungen gegenüber der idealen Form bedingen.

Insgesamt ist zu konstatieren, dass unbekannte geometrische Verformungen bei Batteriemodulen insbesondere in Stapelrichtung vorliegen, die eine sensorbasierte Erfassung der Produktgeometrie für die automatisierte Batteriemoduldemontage unerlässlich machen. Für die Geometrieerfassung wird nachfolgend auf ein 3D-Kamerasystem gesetzt, welches als geeignet eingestuft wird (vgl. Kapitel 2.4.1).

¹ <https://rogerscorp.com/elastomeric-material-solutions/poron-industrial-polyurethanes/poron-evextend>

4.1.5 Gefahrenanalyse und Risiken durch Lithium-Ionen-Zellen

Eine Modellierung der möglichen Gefahren, ausgehend von Lithium-Ionen-Zellen und deren Auswirkungen auf den Menschen sowie die Umwelt, wurde in (Gerlitz et al. 2022) publiziert. Die Modellierung findet in Form eines Ursache-Wirkungs-Diagramms für die Domänen elektrisch, mechanisch, chemisch sowie thermisch statt. Eine Zusammenfassung der Ursache-Wirkungskette mit externen Einflussfaktoren, internen und externen Effekten sowie Konsequenzen für Mensch und Umwelt über die vier Domänen ist in Abbildung 4–6 ersichtlich. Als externe Einflussfaktoren, welche zu gefährlichen Zuständen (wie Thermal Runaway) führen können, sind (I) externe Hitzezufuhr (thermisch), (II) externer Kurzschluss (elektrisch) oder (III) mechanische Deformation (mechanisch) zu nennen.

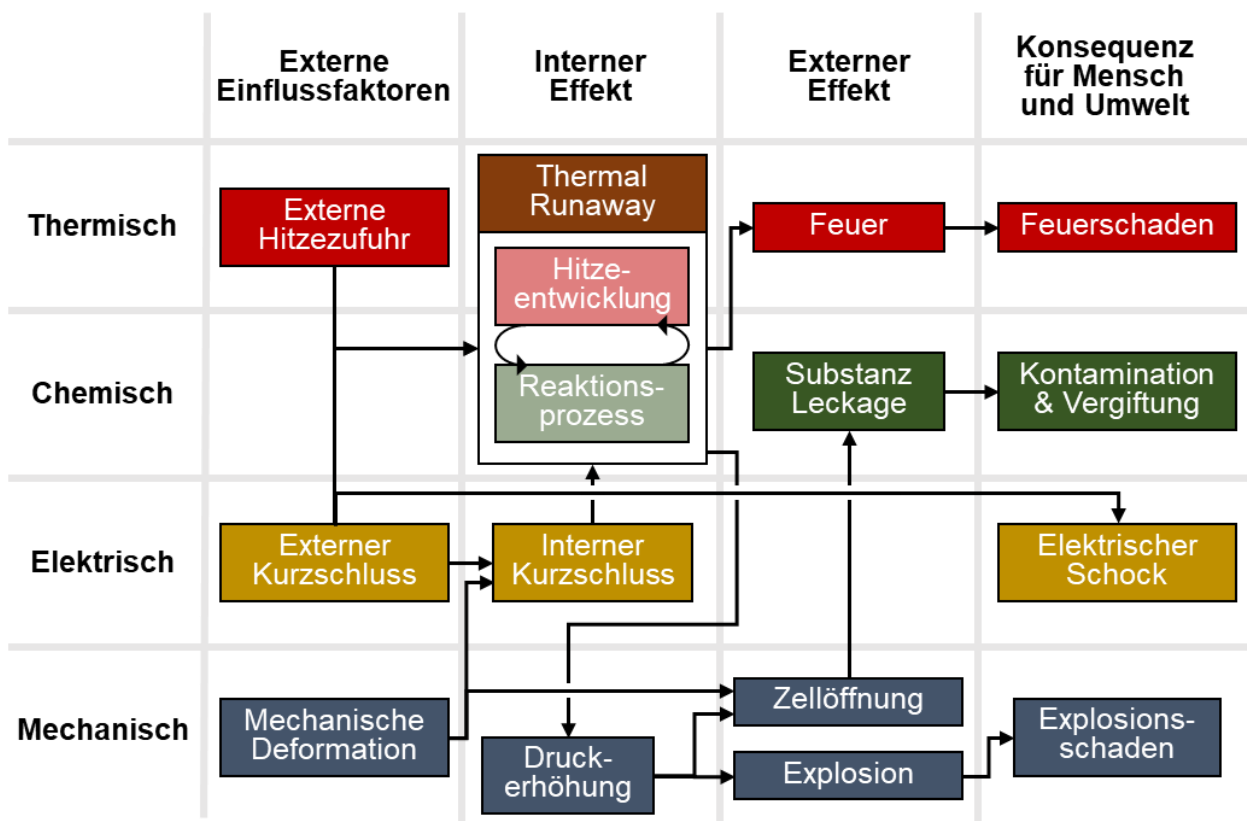


Abbildung 4–6: Ursache-Wirkungskette der Gefahren und Auswirkungen bei Lithium-Ionen-Batterien in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2022)

Eine Maßnahme zur frühzeitigen Detektion gefährlicher Zustände von Lithium-Ionen-Zellen bei unsachgemäßer Handhabung ist die Produktzustandsüberwachung mithilfe einer Thermografiekamera (siehe (Gerlitz et al. 2022)). Unabhängig davon wird die Wahl eines geeigneten Prozesses mit Parametern mit möglichst geringem Einfluss auf die Lithium-Ionen-Zellen in Anbetracht der verschiedenen Gefahren nahegelegt. Dies

gilt insbesondere für das Trennen der Zellkontaktierungen, was als besonders kritisch einzustufen ist, begründet durch die unmittelbare Nähe zur Zelle sowie das Vorliegen einer unlösbaren Fügeverbindung an der Kontaktierung. Nachfolgend liegt der Fokus auf der Wahl eines geeigneten Prozesses mit sicheren Parametern für das Trennen der Zellkontaktierungen. Die Produktzustandsüberwachung wird nicht weiterverfolgt.

Eine Besonderheit stellt eine tiefentladene Lithium-Ionen-Zelle dar. Aufgrund der fehlenden Spannung würde in diesem Fall die elektrische Domäne entfallen, das heißt, (II) externer Kurzschluss ist keine Gefahr bei tiefentladenen Zellen.

Am Beispiel der Zellkontaktierung inklusive des Verbindungsstücks (Busbar) ergeben sich, ausgehend von den Gefahren durch Lithium-Ionen-Zellen, folgende Anforderungen an den Trennprozess:

- (1) Es darf prozessbedingt eine maximale Wärmemenge Q_{max} an die Zellen übertragen werden bzw. die Grenztemperatur T_{max} an den Zellen über eine definierte Zeitdauer vorliegen. Unterschiedliche Grenztemperaturen aus der Literatur bzw. dem Datenblatt der Referenzzelle sind in Tabelle 4-6 aufgeführt. Ein Prozess gilt in Bezug zur thermischen Gefahr als sicher, wenn die kritischste vorliegende Temperatur am Zellpol durchgehend kleiner als die Grenztemperatur T_{max} ist. Für nachfolgende Betrachtungen wird eine Grenztemperatur von $T_{max} = 65\text{ °C}$ in Anlehnung an (DIN EN IEC 62660-3) angenommen.
- (2) Externer Kurzschluss kann durch ein elektrisch leitendes Medium herbeigeführt werden, welches bei Prozessinteraktion entsteht. Als Beispiel hierfür sind beim Zerspanen Späne zu nennen. Als kritischer Abstand a_{krit} gilt der kürzeste Abstand zwischen den Zellpolen unterschiedlicher Spannung an zwei Batteriezellen (vgl. Abbildung 4–7): $a_{krit} = z_b - p_{p+}$. Ein Prozess gilt in Bezug zur elektrischen Gefahr als sicher, wenn die maximale, kritische Länge $l_{krit,max}$ eines elektrisch leitenden Mediums kleiner ist als der kritische Abstand a_{krit} . Als kritische Länge l_{krit} wird hierbei der Abstand zwischen den zwei entferntesten Punkten im geometrischen Körper bezeichnet. Am Beispiel der CATL NMC 48Ah 3,7V beträgt der kritische Abstand $a_{krit} = 7,82\text{mm}$.
- (3) Eine mechanische Deformation wird durch eine externe Kraft herbeigeführt. Einen Sonderfall stellen Pouchzellen (bedingt durch das labile Zellgehäuse) dar, welche besonders anfällig für Deformation sind. In (Keshavarzi et al. 2022) wurden Kräfte von über 300 N im kritischsten Belastungsfall (3-Punkt-Biegeversuch)

auf eine definierte Pouchzelle aufgebracht, bevor es zum Versagensfall gekommen ist. Der Fokus dieser Arbeit liegt hingegen auf prismatischen Zellen mit stabilem Hardcase-Zellgehäuse, welche höhere Kräfte tolerieren können. Für eine konservative Abschätzung wird dennoch die Kraft von 300 N aus der Literatur als maximal erlaubte Kraft F_{max} in x/y/z-Richtung angenommen. Ein Prozess gilt in Bezug zur mechanischen Gefahr als sicher, wenn die vorliegende Prozesskraft durchgehend kleiner als die maximal erlaubte Kraft $F_{max} = 300 \text{ N}$ ist.

Tabelle 4-6: Übersicht maximaler Grenztemperaturen aus verschiedenen Quellen

Grenztemperatur	Wert	Quellen
Max. Betriebstemperatur beim Laden/Entladen gemäß Datenblatt der Zelle*	55 °C	CATL NMC 48Ah 3,7V
Beginn der anodischen Reaktionen beim Thermal Runaway	90 °C	(Lisbona & Snee 2011)
Max. Temperatur beim Temperaturwechsel gemäß Prüfnorm	80 °C	(DIN EN 12405-1; DIN EN 12405-2; DIN EN 12405-3)
	65 °C	(DIN EN IEC 62660-3)
Max. Temperatur bei erhöhter Temperatur gemäß Prüfnorm	(130 ± 2) °C	(DIN EN IEC 62660-3)
	(85 ± 5) °C	(DIN EN IEC 62619)

* Der Wert dient als Referenz zur Einschätzung der aufgeführten Grenztemperaturen.

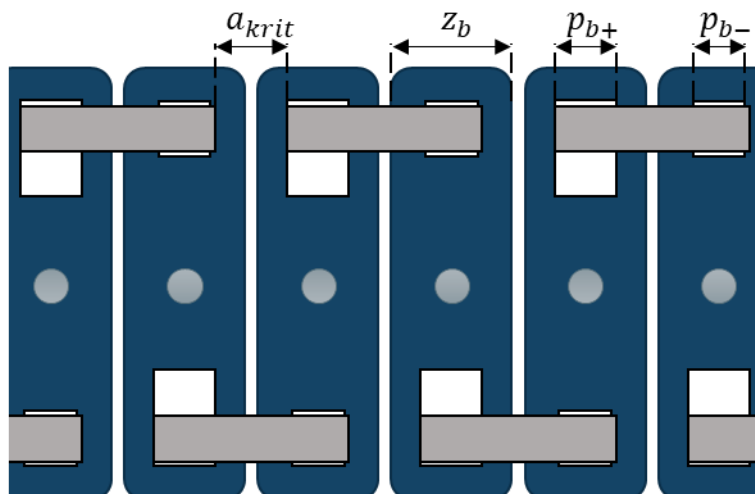


Abbildung 4–7: Beispielhafte Illustration des kritischen Abstands a_{krit}

4.2 Analyse des Trennproblems und Lösungsalternativen

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst eine Analyse des Trennproblems durchgeführt und eine Trennstrategie ausgewählt. Anschließend werden Lösungsalternativen für Trennverfahren gegenübergestellt und eingegrenzt.

4.2.1 Analyse des Trennproblems und Auswahl der Trennstrategien

Abbildung 4–8 zeigt (in Anlehnung an Kapitel 4.1.3) für eine einfache, serielle Verschaltung den Aufbau einer Zellkontaktierung, bestehend aus Zellterminal sowie Busbar. Das Ziel stellt die Aufhebung der stoffschlüssigen Verbindung zwischen den elektrischen Polen der Zellen dar, sodass nach dem Trennen keine elektrische Verbindung mehr vorliegt.

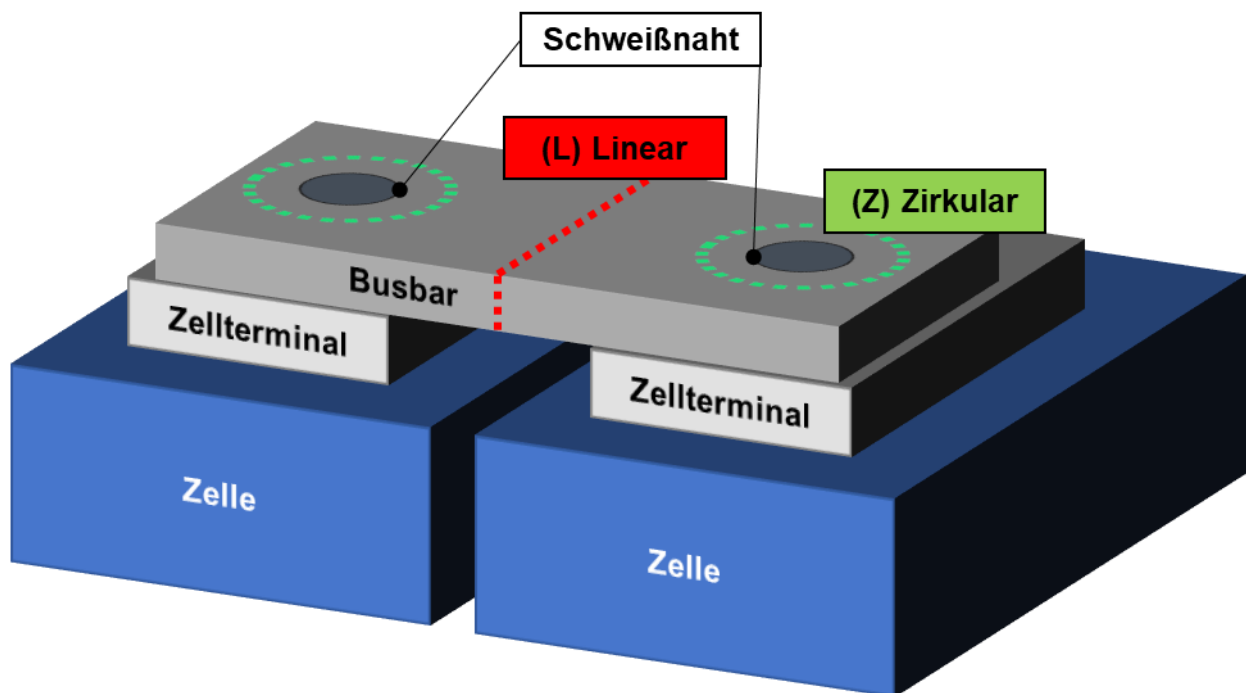


Abbildung 4–8: Aufbau einer Zellkontaktierung und Darstellung der möglichen Lösungsalternativen

Als mögliche Lösungsalternativen für die Trennstrategie stehen folgende Varianten zur Verfügung:

- Variante 1: **Zirkular** um den bzw. an dem jeweiligen Schweißpunkt (grün)
- Variante 2: **Linear**, mittig zwischen den Zellpolen (rot)

Eine Gegenüberstellung beider Lösungsalternativen ist in Tabelle 4-7 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4-7: Gegenüberstellung der möglichen Trennstrategien

Kriterien	(Z) ZIRKULAR	(L) LINEAR	
Vorliegen eines losen Bauteils nach dem Trennen	Ja	- Nein	+
Kenntnisse der Schweißpunktposition erforderlich	Ja	- nein	+
Komplexität der Schnittbahn	Kreisbahn, Punkt	0 Linear	+
Fehlertoleranz hinsichtlich Tiefengenaugkeit	Nein, Zellterminal direkt unter Busbar	- Ja, Zellterminal nicht direkt unter Busbar	+

Insbesondere sprechen die erforderlichen Kenntnisse über die Position des Schweißpunktes gegen (Z). Große Vorteile bei (L) stellen die kurze Länge sowie die Einfachheit der Schnittbahn dar. Hervorzuheben ist die Fehlertoleranz gegenüber Tiefenungenauigkeit, welche bei (Z) aufgrund der unmittelbaren Nähe zum Zellterminal nicht gegeben ist. Das Entfernen der Überreste kann in nachfolgenden Demontagestationen erfolgen, welche für diesen Prozessschritt spezialisiert sind.

Der Fokus nachfolgender Betrachtungen liegt somit auf dem linearen Schnitt, welcher sich mittig zwischen beiden Zellterminals befindet.

4.2.2 Lösungsalternativen für Trennverfahren und Eingrenzung

Im Folgenden werden Lösungsalternativen für das Trennen der Zellkontaktierungen mit entsprechenden Trennverfahren vorgestellt und eingegrenzt. Im ersten Schritt werden nicht geeignete Verfahren durch Ausschlusskriterien ausgegrenzt. Im Anschluss werden die verbliebenen Trennverfahren gegenübergestellt und es wird das geeignetste Verfahren ausgewählt.

Mögliche Trennverfahren inklusive der ausschließbaren Verfahren (kursiv) werden nachfolgend aufgeführt (angelehnt an Kapitel 2.2.1) (A_Littau 2020):

- Brennschneiden (1)
- Plasmaschneiden (1)
- Laserstrahlschneiden (1)
- Wasserstrahlschneiden (1)
- (Schneid)-Erodieren (2)
- Zerteilen (3)

- Zerspanen mit geometrisch bestimmter Schneide
- Zerspanen mit geometrisch unbestimmter Schneide

Ausschlusskriterium sind jeweils:

- (1) Hohe Gefahr der Beschädigung des Zellgehäuses durch austretenden Strahl
- (2) Kurzschlussgefahr durch eingesetzte, elektrisch leitfähige Werkzeuge wie Erodierdraht (Klocke & König 2007)
- (3) Erforderliche beidseitige Zugänglichkeit (Fritz 2018) nicht immer gegeben

Zur engeren Auswahl stehen spanende Verfahren **(A) mit geometrisch bestimmter Schneide (bspw. Bohren, Fräsen)** und **(B) mit geometrisch unbestimmter Schneide (bspw. Schleifen)**. Beim letztgenannten Verfahren tritt gemäß (Fritz 2018) ein permanenter Verschleiß der Schleifscheiben auf. Die Abnahme des Scheibenradius, bedingt durch den Radiusverschleiß, würde ohne zusätzliche Sensorik im schlimmsten Fall zum Verfehlen der Kontaktstelle am Werkstück und somit zum nicht erfolgreichen Trennen der Fügeverbindung führen. Daher ist zusätzliche Sensorik zur Erfassung der Kontaktstelle erforderlich, die mit Zusatzkosten verbunden ist. Weiterhin sprechen kürzere Standzeiten sowie höhere thermische Belastungen gegen das Zerspanen mit geometrisch unbestimmter Schneide, wie es beim Schleifen der Fall ist. Insbesondere sind die höheren Temperaturen beim Zerspanen von Aluminium aufgrund der geringen Schmelztemperatur von 660 °C (Ostermann 2014) besonders kritisch zu bewerten. Von ungleichmäßigen Verschleißraten wurde in (Vongbunyong & Chen 2015) beim Einsatz von Schleifen als Trennverfahren berichtet, was geringfügige Unterschiede in der Schnittposition zur Folge hatte.

Die aufgeführten Punkte motivieren den Einsatz von spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, welche nachfolgend fokussiert werden. Mögliche Trennverfahren nach (DIN 8580) sind das **Bohren, Fräsen** sowie **Sägen**. Aufgrund der ausgewählten Trennstrategie (vgl. Kapitel 4.2.1), eines linearen Trennschnitts am Busbar mittig zwischen den Zellterminals, entfällt das Bohren.

Während sich das Sägen auf lineare Schnitte beschränkt, bietet das Fräsen zusätzlich eine deutlich höhere Flexibilität hinsichtlich der Frässchnitt-Geometrie, beispielsweise durch die Möglichkeit zur Realisierung von kurvenartigen Schnitten. Dies kann insbesondere bei Schweißverbindungen mit einer längeren Schweißraupe am Gehäuse von Vorteil sein, da gezielt direkt neben der Schweißraupe ein Frässchnitt gesetzt wird. Auch sind zirkuläre Frässchnitte, bspw. um Schraubköpfe, mittels Fräsen möglich. Um

den Werkzeugwechsel zu minimieren, wird vorwiegend auf ein Trennverfahren bzw. ein Werkzeug gesetzt. Diese Flexibilität motiviert den Einsatz des **Fräsen** als flexibles Trennverfahren, weswegen dieses Verfahren im Fokus der vorliegenden Arbeit steht.

Nach (DIN 8589-3) wird bei Fräsverfahren zwischen Planfräsen, Rundfräsen, Wälzfräsen, Formfräsen und Profilfräsen unterschieden. Bis auf das **Planfräsen** sind die genannten Verfahren speziell auf die Ausbildung definierter, dreidimensionaler Strukturen und Formen ausgelegt, was in diesem spezifischen Anwendungsfall nicht erforderlich ist. Da im vorliegenden Anwendungsfall lediglich ein einfacher, linearer Schnitt mittig auf dem Busbar erforderlich ist (vgl. Kapitel 4.2.1), wird das Planfräsen als die effizienteste und zweckmäßigste Variante gewählt, während die anderen Verfahren aufgrund ihrer höheren Komplexität ausgeschlossen werden.

Nach (Klocke 2018) kann eine Unterteilung der Fräsverfahren anhand der Art und Form des genutzten Werkzeugs vorgenommen werden. Die Planfräsverfahren mitsamt den Vorschubrichtungen sind in Abbildung 4–9 dargestellt.

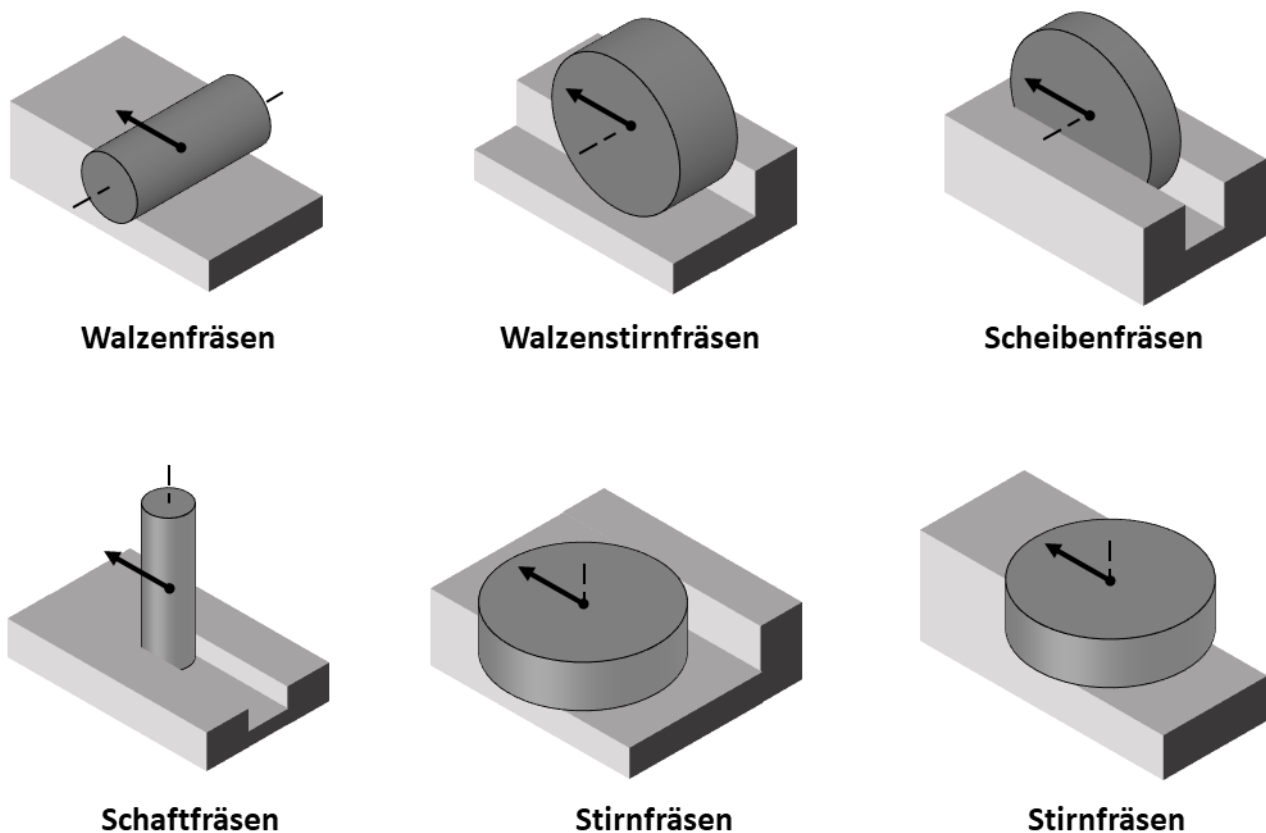


Abbildung 4–9: Planfräsverfahren in Anlehnung an (Klocke 2018)

Für den vorgestellten Anwendungsfall sind der **Scheiben- und der Schaftfräser** besonders geeignet. Aufgrund der größeren Variabilität der Frässchnittform wird auf den **Schaftfräser** gesetzt. Gemäß (Klocke 2018) wird das genannte Verfahren [„...vorteilhaft zur Erzeugung ... zur Ausbildung von Nuten, Taschen, Schlitzten und Aussparungen aller Art und Größe eingesetzt.“]

4.2.3 Anwendung von Trennstrategie und -verfahren

Die ausgewählte Kombination aus Trennstrategie und -verfahren für das Trennen der Zellkontaktierungen ist in Abbildung 4–10 illustriert. Mithilfe eines Schaftfräasers definierter Dicke d_w wird ein Schlitz mittig auf die Busbar gesetzt. Die Breite des Schlitzes kann durch den Werkzeugdurchmesser d_w angenähert werden. Die Rotationsachse des Werkzeugs ist senkrecht zur Produktoberfläche orientiert, d. h., die Rotationsachse ist parallel zur x-Richtung des Werkstück-Koordinatensystems (KOS_{OBJ}). Die ideale Fräsbahn verläuft in y-Richtung (KOS_{OBJ}).

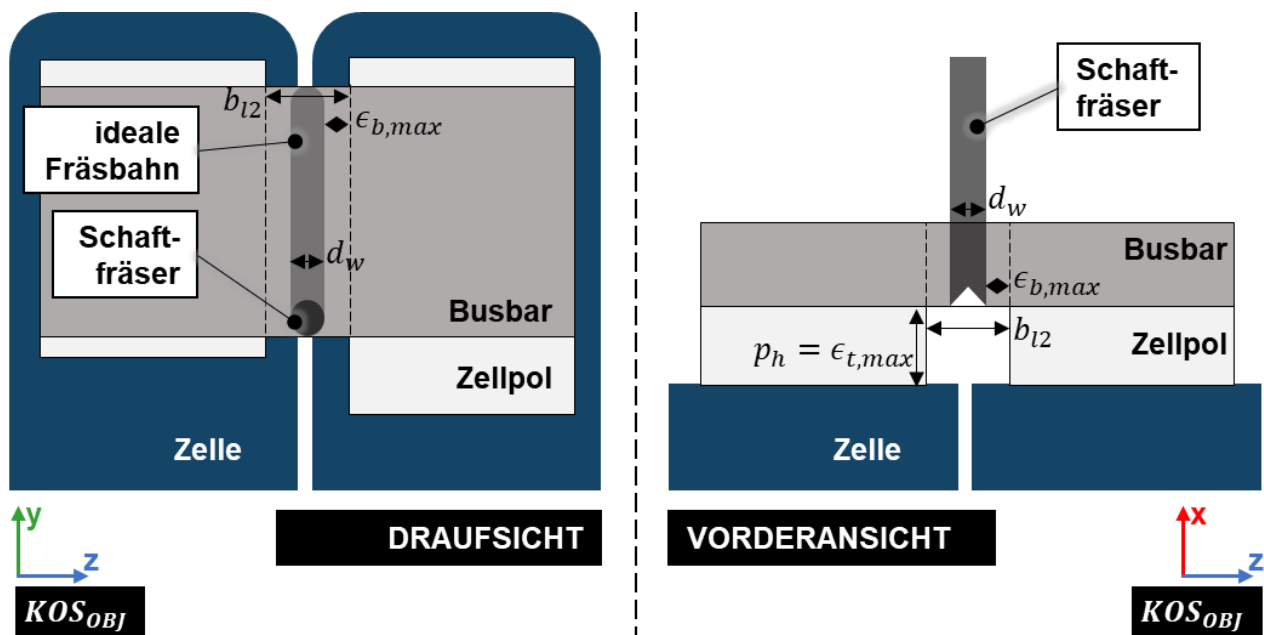


Abbildung 4–10: Veranschaulichung der ausgewählten Kombination aus Trennstrategie und Trennprozess

Der Vorteil dieser gewählten Kombination aus Trennstrategie und -verfahren ist die Fehlertoleranz gegenüber geometrischen Abweichungen beim Prozess in der eingesetzten Demontageanlage. Die Tiefenabweichung ϵ_t des Prozesses richtet sich nach der Zellpolhöhe p_h und sollte kleiner als der genannte Wert sein. Die Bahnabweichung ϵ_b sollte weniger als die Hälfte der Differenz aus Brückenlänge b_{l2} und Fräserdurchmesser d_w betragen.

4.3 Anforderungen an das Demontagesystem

Nachfolgend werden für den Prozessschritt *Trennen der Zellkontaktierungen* die Anforderungen an das Sensorsystem, den Trennprozess und den damit verbundenen Endeffektor sowie die Kinematik vorgestellt. Ausgehend von der Produktanalyse von Lithium-Ionen-Batteriemodulen (siehe Kapitel 4.1) sowie weiteren Randbedingungen kann eine Anforderungsliste an das Demontagesystem mit Fokus auf das *Trennen der Zellkontaktierungen* definiert werden (vgl. Tabelle 4-8). Die spezifizierten Anforderungen können die Kinematik inklusive Spannsystem (K), das Trennwerkzeug (T) sowie das Kamerasystem (C) betreffen (in Tabelle mit x markiert).

Tabelle 4-8: Anforderungen an das Demontagesystem, unterteilt in Kinematik/Spannsystem (K), Werkzeug (T) sowie Kamerasystem (C)

Anforderung	Wert(e)/-bereiche	K	T	C
Batteriemodul				
Abmessung B x T x H [m]	max. 1,1 x 0,3 x 0,4	x		x
Form des Körpers	Quaderförmiger, vollflächiger Körper	x		x
(komplexe) Oberflächenstrukturen	wenige bis keine		x	x
Stark reflektierende Bereiche	ggf. vorhanden (Aluminium-Gehäuse)			x
Stark lichtabsorbierende Bereiche	wenige bis keine			x
Hinterschnitte/Okklusionen	wenige bis keine			x
Zellkontaktierung				
Material Busbar	vorwiegend Alu99,5 (AW1050A-H14)		x	
Abgeschätzte, erforderliche Genauigkeiten [mm]	< 1	x	x	x
Mögliche Position der Fügeverbindung	Auf einer bzw. zwei Seiten der Mantelfläche (gegenüberliegend)	x		x
Störende Bauteile in unmittelbarer Nähe	Neben den Busbars: Kunststoffplatte als Montagehilfe für Busbars		x	x
Zugang zur Fügeverbindung	Direkt an der Oberfläche	x	x	x
Umgebung				
Lichtverhältnisse	Künstliches Licht mit konstanten Lichtverhältnissen			x
Raumtemperatur [°C]	22	x		x

Wirtschaftliche Aspekte (wie Produktivität und Kosten) sind in der Betrachtung direkt ausgeschlossen, da insbesondere die technische Machbarkeit und Realisierung im Vordergrund stehen. Für sicherheitsrelevante Aspekte wird hingegen auf die Normen (DIN EN ISO 12100) und (DIN EN ISO 10218-1; DIN EN ISO 10218-2) verwiesen.

Im nachfolgenden Kapitel wird näher auf das umgesetzte Demontagesystem eingegangen, welches die aufgeführten Anforderungen erfüllt.

4.4 Ausschnitt des Gesamtsystems zum Trennen der Zellkontaktierungen

In diesem Kapitel wird auf ein Demontagesystem für die flexible Zerlegung von Lithium-Ionen-Batteriemodulen Bezug genommen, das die Anforderungen aus Kapitel 4.3 vollumfänglich erfüllt. Der vollständige Aufbau des flexiblen Demontagesystems wurde in (Gerlitz et al. 2023b) umfassend dargestellt. Nachfolgend wird ein spezifischer Ausschnitt des Demontagesystems mit den essenziellen Subsystemen vorgestellt, die für das Trennen der Zellkontaktierungen verantwortlich sind.

Abbildung 4–11 visualisiert die einzelnen Subsysteme, welche wesentlich zum Trennen der Zellkontaktierungen sind. Dazu zählen ein **6-Achs-Knickarmroboter** zum Ausführen der Bewegung sowie eine **Hochfrequenzspindel** (befestigt am Roboterflansch) für Trennoperationen. Die Fräswerkzeuge sind in einem HSK-Spannsystem (Spannzange mit Spannzangenfutter) eingespannt. Die vorliegende Spindel bietet eine Schnittstelle zur Aufnahme der Spannzangenfutter HSK-F63. Ein Schnellwechsel zwischen Roboterflansch und Spindel ermöglicht den Tausch von Werkzeugen, wie beispielsweise Greifern. Das **flexible Spannsystem** kann das Batteriemodul vertikal einspannen. Dank eines Servomotors inklusive Haltebremse mit nachgeschaltetem Getriebe lässt sich das eingespannte Batteriemodul gezielt drehen. Die Einspannung kann entweder positionsgesteuert oder kraftgeregelt erfolgen. Durch Austausch der Spannbacken können Batteriemodule mit unterschiedlichen Geometrien (stirnseitig) sowie Längen eingespannt werden. Die **Steuerung**, eine numerische Steuerung, kann durch Abarbeiten eines NC-Codes alle Subsysteme sowie die Peripherie ansteuern. Die **3D-Kamera** ist seitlich am Spannsystem stationär mit einem definierten Arbeitsabstand zum eingespannten Batteriemodul montiert.

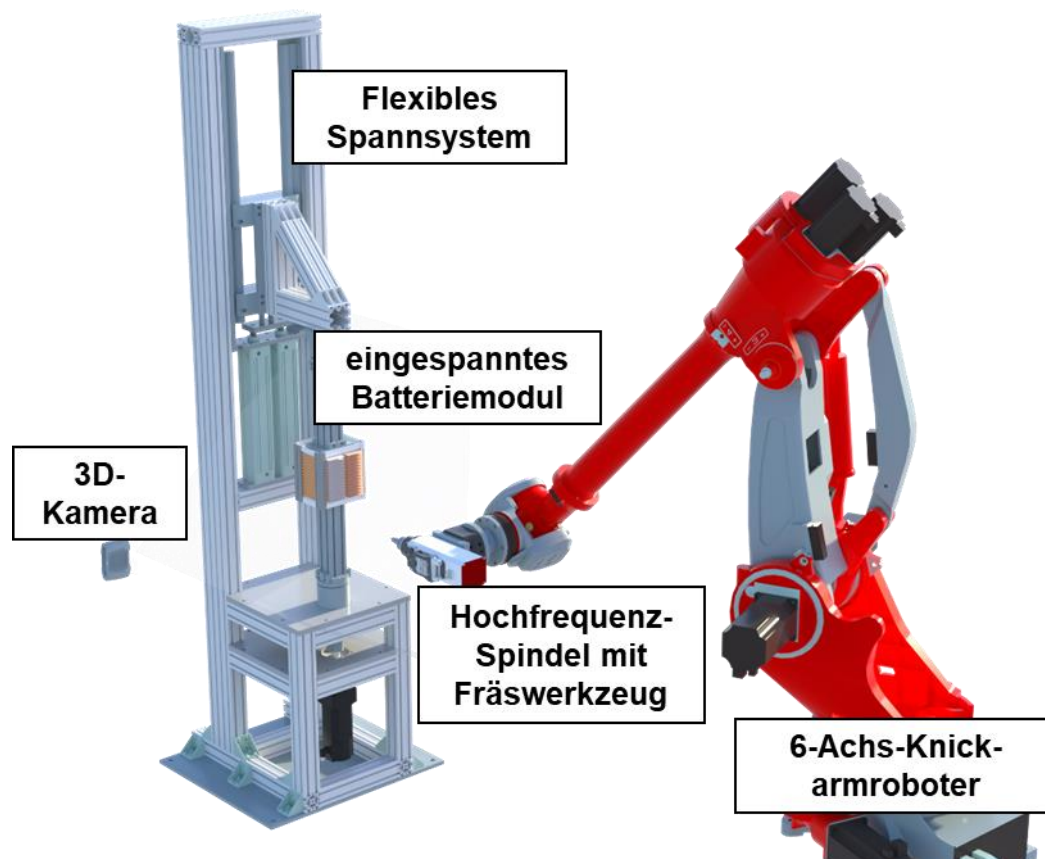


Abbildung 4–11: Subsysteme zum Trennen der Zellkontaktierungen in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)

Eine Auflistung aller erworbenen Subsysteme inklusive Hersteller sowie Modellbezeichnungen ist in Tabelle 4-9 zu sehen. Detaillierte technische Spezifikationen sind in Anhang 11.2, 11.3 sowie 11.4 zu finden. Das Spannsystem stellt eine Eigenentwicklung dar.

Tabelle 4-9: Technische Subsysteme und Modellbezeichnung

Technisches Subsystem	Hersteller sowie Modellbezeichnung
6-Achs-Knickarmroboter	Comau NJ290-3.0
Roboter bzw. Anlagensteuerung	Siemens RunMyRoboter / DirectControl mit CNC-Steuerung SINUMERIK One
Hochfrequenz-Spindel	PDS XLHA110-9/6-4-24-HSK-F63-22-CC-3-EN
Spindel-Steuerung	Bonfiglioli ACU-DS 410-22 FA
3D-Kamera	ZIVID Two

5 Kamerabasierte Verformungserfassung

Wie in Kapitel 4.1.4 näher beschrieben ist, sind Batteriemodule mit geometrischen Verformungen in Stapelrichtung verbunden. Das automatisierte Trennen der Zellkontaktierungen mittels Schaftfräsen erfordert hingegen für einen erfolgreichen Trennschnitt hohe (Bahn-)Genauigkeiten (siehe Kapitel 4.2.3), was folglich eine sensorbasierte Geometrieerfassung des zu demontierenden Objekts unabdingbar macht. Als Sensorsystem wurde ein 3D-Kamerasystem auf Basis der Streifenlichtprojektionstechnologie (vgl. Kapitel 4.4) vorausgewählt.

Im Folgenden soll ein Ansatz für einen kamerabasierten Abgleich des realen Batteriemoduls mit dem idealen CAD-Modell als Referenzmodell vorgestellt werden. Der Abgleich ermöglicht die Findung von Korrespondenzpunkten zwischen dem idealen Referenzmodell, aus welchem die Werkzeugbahn in Form von Stützpunkten extrahiert wird, und der 3D-Aufnahme des realen Objekts (vgl. Kapitel 3.1). Zunächst wird im Folgenden auf die Kalibrierung eingegangen, womit der Bezug zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen hergestellt wird. Weiterhin wird die Verarbeitungspipeline für die kamerabasierte Verformungserfassung und die anschließende Lokalisierung der Werkzeugbahnstützpunkte präsentiert. Schließlich werden Validierungsergebnisse zum vorliegenden 3D-Kamerasystem sowie zur Verarbeitungspipeline vorgestellt.

5.1 Kalibrierung

Ein Ausschnitt der flexiblen Roboterzelle, welche die essenziellen Subsysteme für die Trennprozesse des eingespannten Batteriemoduls beinhaltet, ist mit den elementaren Koordinatensystemen (KOS) in Abbildung 5–1 ersichtlich. Ein 6-Achs-Knickarmroboter (Comau NJ290-3.0) mit einer Frässpindel als Endeffektor und einer 3D-Kamera (ZIVID Two) sind in der Abbildung dargestellt. Ein flexibles Spannsystem ermöglicht durch die gezielte Drehung des eingespannten Batteriemoduls eine 360 °-Zugänglichkeit für die Frässpindel sowie die 3D-Kamera und dient somit als Drehtisch.

Als Basis-KOS dient das Kamera-KOS KOS_{CAM} . Eine Übersicht der elementaren Koordinatensysteme ist in Tabelle 5-1 aufgeführt. Die Bezugsherstellung zwischen den Koordinatensystemen erfolgt mithilfe von homogenen Transformationsmatrizen, die eine Punktwolken-Transformation zwischen KOS ermöglichen (vgl. Kapitel 2.4.1). Das Roboterflansch-KOS KOS_{EE} befindet sich am Flansch des Roboterarms, zur Vereinfachung ist KOS_{EE} in Abbildung 5–1 ausgeblendet.

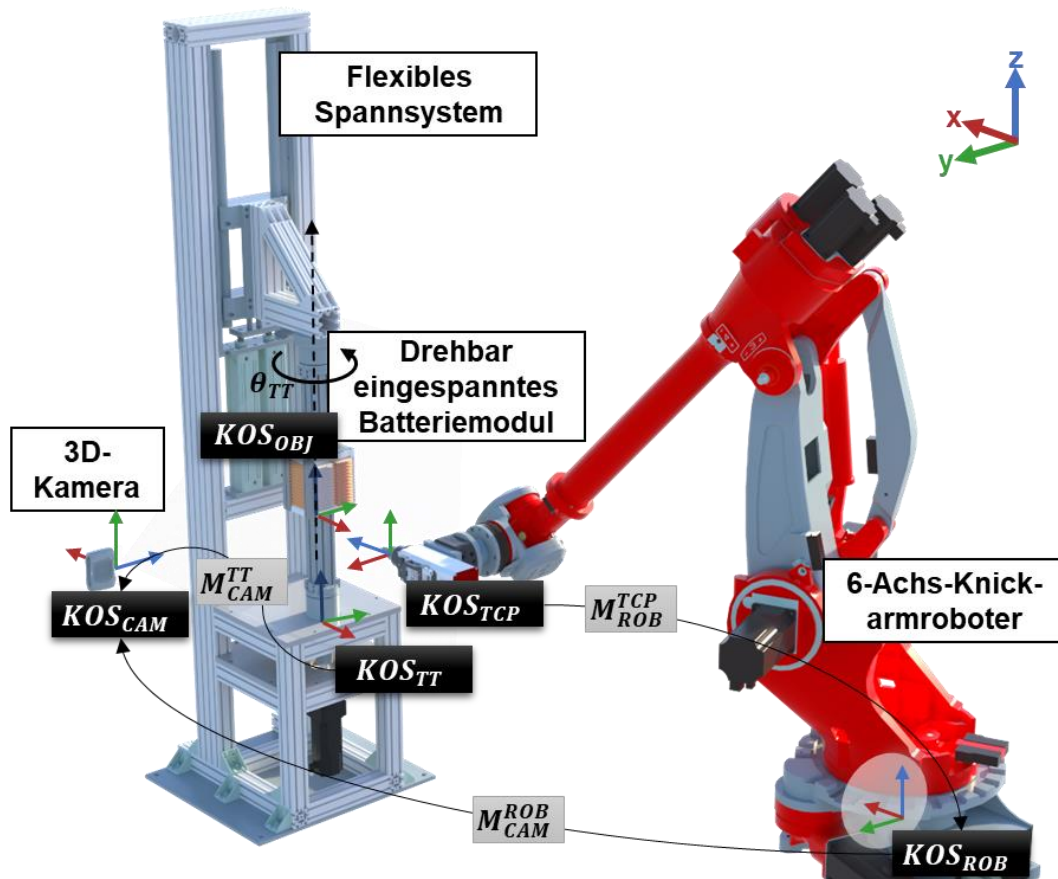


Abbildung 5–1: Elementare Koordinatensysteme in der flexiblen Demontageanlage in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)

Die Matrix M^{TCP}_{ROB} folgt aus den Denavit-Hartenberg (DH)-Parametern, der aktuellen Winkelstellung der Roboterachsen sowie den Konstruktionsdaten der Spindel und des Spindeladapterflansches. Im Folgenden wird näher auf die Ermittlung der Matrizen M^{TT}_{CAM} sowie M^{ROB}_{CAM} mittels Kalibrierungsverfahren eingegangen. Die grundsätzliche Idee hinter der Kalibrierung zwischen den einzelnen Teilsystemen der Roboterzelle basiert auf (Tsai & Lenz 1989). Die Kamera ist dabei stationär montiert, ein Referenzboard (hier: Schachbrettmuster) wird gezielt bewegt.

Tabelle 5-1: Übersicht über die elementaren Koordinatensysteme

Koordinatensystem	Abkürzungen
Kamera-KOS	KOS_{CAM}
Drehtisch-KOS	KOS_{TT}
Werkstück-KOS	KOS_{OBJ}
Roboterbasis-KOS	KOS_{ROB}
Roboterflansch-KOS	KOS_{EE}
Werkzeug-KOS	KOS_{TCP}

5.1.1 Kalibrierung des Drehtisch-Koordinatensystems

Die Grundlagen für die Kalibrierung zwischen dem Kamera-Bezugssystem KOS_{CAM} und dem Drehtisch-Bezugssystem KOS_{TT} wurden im Rahmen der Thesis (A_Enslin 2022) erarbeitet und werden im Folgenden dargelegt. Die Kalibrierung ist ein elementarer Schritt zur Ermittlung des Objekt-Bezugssystems KOS_{OBJ} , abhängig vom aktuellen Drehwinkel θ_{TT} des Spannsystems. Der Drehwinkel θ_{TT} ist eine bekannte Größe und wird durch die Gesamtanlagensteuerung vorgegeben. Der Drehtisch (engl.: Turntable) soll im weiteren Verlauf der Arbeit stellvertretend für das Spannsystem stehen.

Die zugrunde liegende Problemstellung ist in Abbildung 5–2 dargestellt. Hier sind das Kamera-KOS KOS_{CAM} sowie das Drehtisch-KOS KOS_{TT} aufgeführt. Das Objekt-Koordinatensystem KOS_{OBJ} unterscheidet sich durch eine Rotation um die z-Achse von KOS_{TT} . Das Ziel der Kalibrierung stellt die Identifikation der Transformationsmatrix M_{CAM}^{TT} zwischen KOS_{CAM} sowie KOS_{TT} in Form einer homogenen Matrix dar.

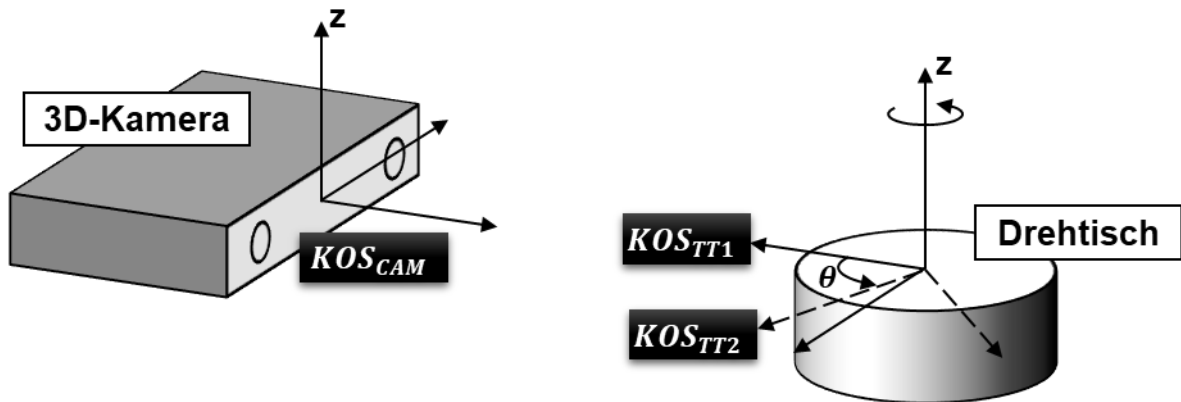


Abbildung 5–2: Bezugssysteme KOS_{CAM} und KOS_{TT} in Anlehnung an (Zhu et al. 2019)

Der geometrische Zusammenhang wird in Anlehnung an (Zhu et al. 2019) abgebildet durch

$$T_{CAM} \times X = X \times T_{TT} \quad 5-1$$

mit

T_{CAM} für Matrix zur Punkttransformation durch θ_{TT} -Drehung in KOS_{CAM} ,

T_{TT} für Matrix zur Punkttransformation durch θ_{TT} -Drehung in KOS_{TT} ,

$X = M_{CAM}^{TT}$ für die Transformationsmatrix zwischen KOS_{CAM} und KOS_{TT} .

Um die gesuchte Transformationsmatrix $X = M_{CAM}^{TT}$ zu bestimmen, müssen die Matrizen T_{CAM} und T_{TT} ermittelt werden.

T_{TT} ist durch eine definierte Rotation θ_{TT} um die z-Achse in KOS_{TT} bestimmt, welche durch die Drehachsen-Steuerung vorgegeben ist. Zur Identifikation von T_{CAM} in KOS_{CAM} erfolgt eine 3D-Bild-Aufnahme eines Objekts in Form von Punktwolken vor und nach einer definierten Rotation θ_{TT} auf dem Drehtisch. Als rotierendes Objekt wird auf ein Schachbrettmuster gesetzt, welches auf dem Drehtisch fixiert wird, da es markante Punkte beinhaltet. T_{CAM} wird durch Registrierungsverfahren zwischen beiden Aufnahmen ermittelt: Die *Grobregistrierung* wird auf Basis von drei markanten Punkten durch Benutzereingaben auf beiden Aufnahmen durchgeführt. Die Grobausrichtung erfolgt durch die Rotation des Objekts durch Minimierung der Summe der Fehlerquadrate der korrespondierenden Punkte. Danach findet die Feinregistrierung mit dem ICP-Algorithmus nach (Besl & McKay 1992) statt. Das Ergebnis stellt die Transformationsmatrix T_{CAM} in KOS_{CAM} dar. Eine Aufnahme des Schachbrettmusters für die Registrierung ist in Abbildung 5–3 illustriert. Kalibrierungsversuche mit verschiedener Anzahl an 3D-Aufnahmen haben gezeigt, dass drei Aufnahmen mit einer Winkeldifferenz von 30° für eine hohe Kalibrierungsgenauigkeit ausreichend sind.

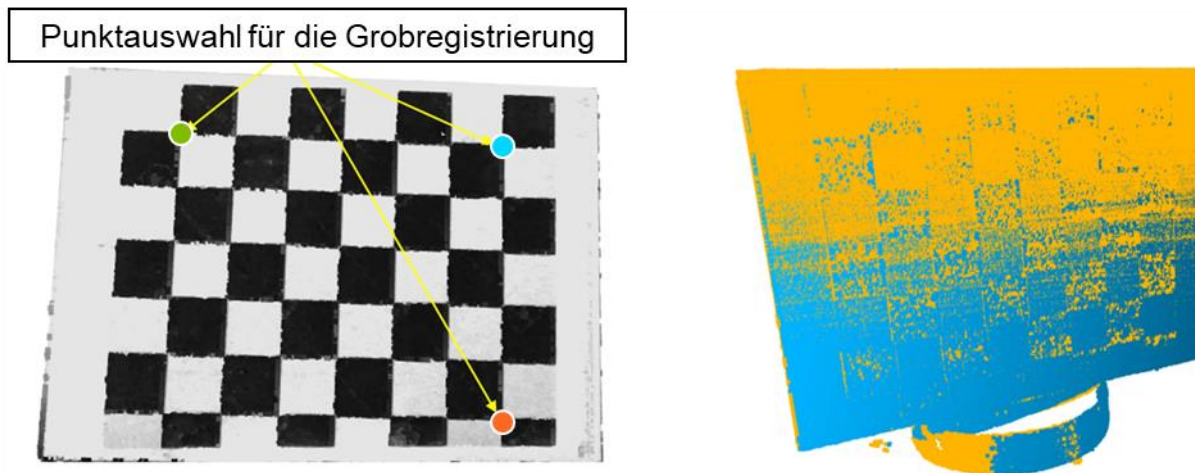


Abbildung 5–3: Aufnahme des Schachbrettmusters für die (links) Grob-Registrierung und (rechts) Fein-Registrierung in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)

Die Auflösung der Formel 5-1 nach $X = M_{CAM}^{TT}$ mit bekannten T_{CAM} und T_{TT} ist analytisch nicht lösbar. Zur näherungsweisen Lösung von X kann der Ansatz von (Horaud & Dornaika 1995) herangezogen werden. In geschlossener Form wird mit dem genannten Ansatz zunächst die Rotation bestimmt, im Anschluss kann die Translation berechnet werden. Zur Steigerung der Genauigkeit wird der Prozess mehrfach ausgeführt. Der

vorgestellte Ansatz zielt auf allgemeine Kalibrierungsaufgaben ab und kann im Fall der vorliegenden Kalibrierungsaufgabe hohe Genauigkeiten erreichen.

Dank der bekannten Transformationsmatrix M_{CAM}^{TT} können aufgenommene Objekte sowie die Aufnahmen selbst um die Rotationsachse des Drehtisches im Kamera-KOS KOS_{CAM} virtuell um einen bekannten Drehwinkel θ_{TT} rotiert werden. Dies ist von essenzieller Bedeutung, insbesondere für das Zusammenfügen der einzelnen 3D-Aufnahmen des Batteriemoduls aus verschiedenen Perspektiven mit dem stationären 3D-Kamerasystem.

Alternativ zum gezeigten Ansatz kann eine deutlich vereinfachte Kalibrierung des Drehtisch-KOS mit dem Schachbrett des Herstellers ZIVID sowie der Hand-to-eye-Kalibrierungsfunktion² von ZIVID erfolgen. Zu jeder 3D-Kameraaufnahme ist lediglich die Vorgabe der Matrix T_{TT} (gegeben durch die Drehtisch-Winkelstellung θ_{TT}) erforderlich. Das montierte ZIVID-Schachbrett an den Spannbacken zur Kalibrierung des Drehtisch-KOS wird in Abbildung 5–4 (links) gezeigt. Nachteilig ist, dass das Kamerasystem sowie das Schachbrett von ZIVID erforderlich sind, was mit zusätzlichen Kosten verbunden ist.

5.1.2 Kalibrierung des Roboterbasis-Koordinatensystems

Die Ausrichtung zwischen dem Kamera-Bezugssystem KOS_{CAM} und dem Roboter-Basis-Bezugssystem durch die Bestimmung der Transformationsmatrix M_{CAM}^{ROB} erfolgt analog zur vorgestellten Methode in Kapitel 5.1.1. Das Ziel stellt ebenfalls die Ermittlung von T_{CAM} und T_{ROB} dar, um nach $X = M_{CAM}^{ROB}$ auflösen zu können.

Die Kalibrierung im vorliegenden System wird folgendermaßen durchgeführt: Am Flansch des Roboters wird ein starres Schachbrettmuster befestigt und mittig zwischen beiden Spannbacken (ohne eingespanntes Batteriemodul) positioniert (siehe Abbildung 5–4 rechts). Das Schachbrett wird gezielt rotiert, um aus verschiedenen Blickwinkeln eine Aufnahme durchzuführen. Wichtig ist, dass sich das Brett im Blickfeld der Kamera befindet und das Schachbrettmuster klar erkennbar ist. Die Matrix T_{CAM} kann durch Registrierungsansätze analog zu Kapitel 5.1.1 ermittelt werden. T_{ROB} ist gegeben durch die Transformationsmatrix M_{ROB}^{EE} zwischen der Roboter-Basis und dem Roboterflansch-Koordinatensystem, welches gemäß (Weber 2019) definiert ist durch

² https://github.com/zivid/zivid-python/blob/master/samples/sample_calibrate_eye_to_hand.py

$$T_{ROB} = M_{ROB}^{EE} = \prod_{n=1}^6 T_{n-1}^n(\theta_n)$$

5-2

mit

T_{n-1}^n für die Transformationsmatrix der einzelnen Achs-Koordinatensysteme,

θ_n für die Winkelstellung der einzelnen (Roboter-)Achsen.

Die gesuchte Transformation $X = M_{CAM}^{ROB}$ kann durch den Ansatz von (Heraud & Dornaika 1995) näherungsweise bestimmt werden.

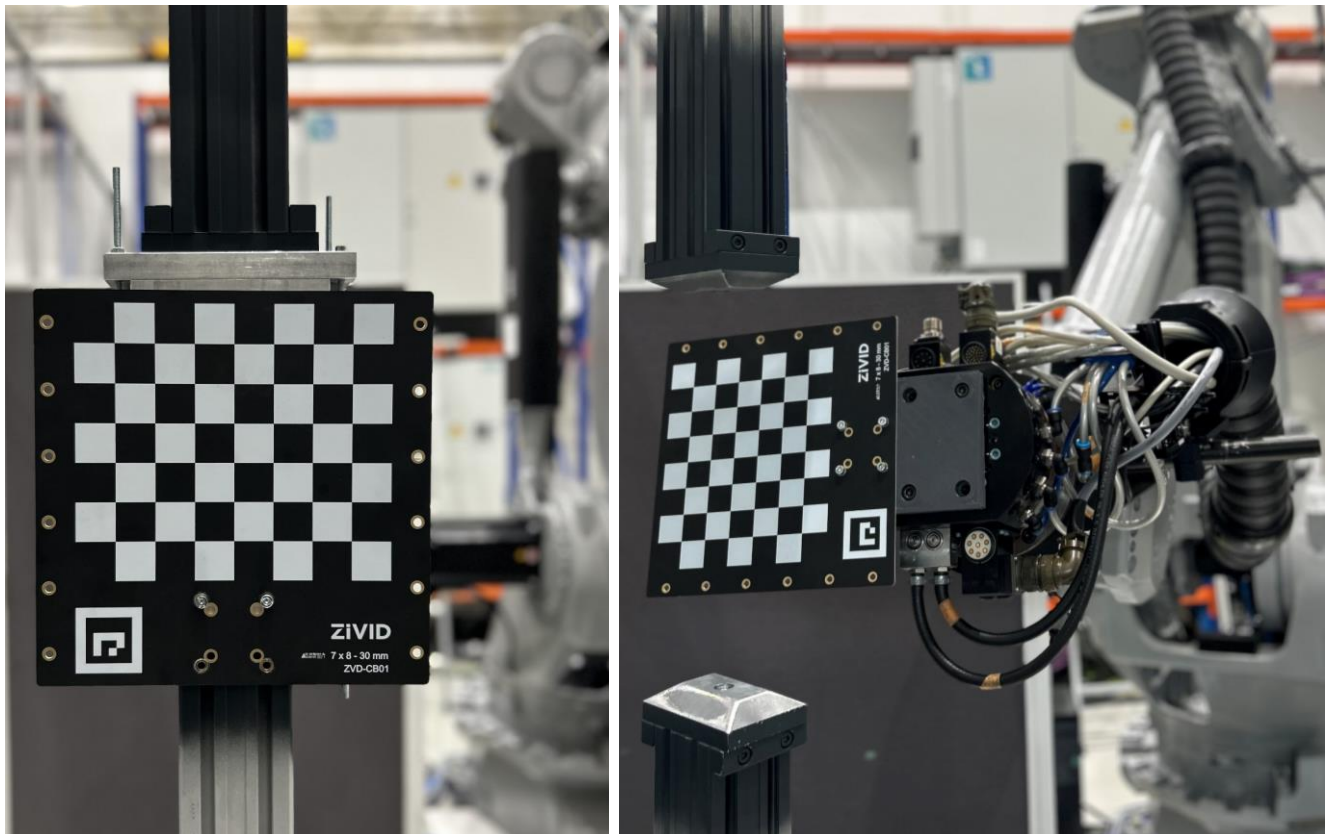


Abbildung 5–4: Montiertes ZIVID-Schachbrett (links) an den Spannbacken zur Kalibrierung des Drehtisch-KOS und (rechts) am Roboterflansch zur Kalibrierung des Roboterbasis-KOS

5.2 Aufbau der Verarbeitungspipeline

Das Ziel der 3D-Verarbeitungspipeline stellt die Punktlokalisierung bzw. Punktkorrespondenzfindung zwischen den Stützpunkten im CAD-Modell, welche die Bearbeitungsbahn für die Fräsoperation abbilden, sowie den Aufnahmen des reellen, verformungsbehafteten Objekts dar. Die Arbeiten zum Aufbau der Verarbeitungspipeline beruhen auf (A_Enslin 2022). Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst dargestellt. Sie wurden zudem in (Gerlitz et al. 2023a) publiziert. Eine Übersicht der Pipeline ist in Abbildung 5–5 dargestellt.

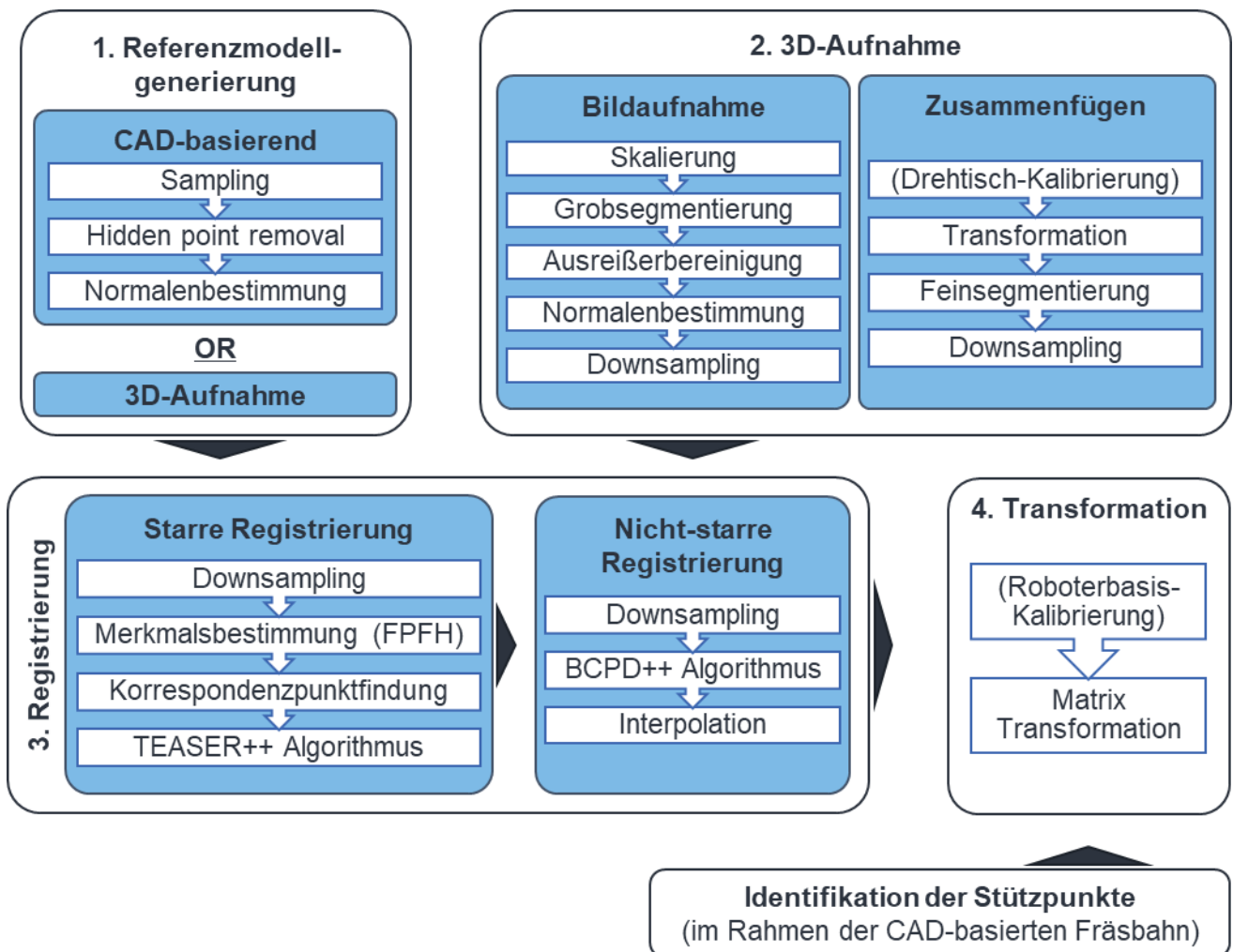


Abbildung 5–5: 3D-Verarbeitungspipeline für die Punktlokalisierung in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)

Die Datenverarbeitung gliedert sich in folgende elementare Schritte:

- Referenzmodellgenerierung: Generierung eines idealen Referenzmodells (CAD-basierend oder 3D-Aufnahme), welches als Basis für die Demontageplanung dient, wie beispielsweise zur Bestimmung der Stützpunkte für die Werkzeugbahn
- 3D-Aufnahme: Mittels stationärem 3D-Kamerasystem und der Rotationsbewegung des Drehtischs/Spannsystems wird eine 3D-Aufnahme des realen Objekts in Form einer bereinigten Punktwolke inklusive Information über Normalenvektor erzeugt
- Registrierung: Abgleich zwischen Referenzmodell und 3D-Aufnahme (hierbei wird zwischen starrer und nicht-starrer Registrierung unterschieden) zur Ermittlung der Transformationsmatrix für jeden Punkt aus der Punktwolke
- Transformation: Anwendung der Transformationsmatrix auf ausgewählte Punkte aus der Demontageplanung (z. B. Stützpunkte für die Fräsbahnplanung)

Nachfolgend wird auf die einzelnen Schritte näher eingegangen.

5.2.1 Referenzmodellerzeugung

Die Referenzmodellerzeugung kann entweder auf Basis eines **(1) CAD-Modells des Objekts** oder von **(2) 3D-Bildaufnahmen des realen Objekts**, welches als ideal angenommen wird, erfolgen. Die letztgenannte Variante kann insbesondere beim fehlenden Zugang zum CAD-Modell angewendet werden.

5.2.1.1 Referenzmodellerzeugung auf Basis eines CAD-Modells des Objekts

Die Erzeugung eines Referenzmodells **auf Basis eines CAD-Modells** kann in drei Schritten erfolgen: 1. Sampling, 2. Hidden Point Removal und 3. Normalenbestimmung.

Sampling

Nach dem Stand der Technik existieren verschiedene Repräsentationsformen zur virtuellen Abbildung der 3D-Objektgeometrie, wie beispielsweise Oberflächenrepräsentation oder Volumenkörper (Vajna et al. 2009). Zur Speicherung der 3D-Informationen kommen unterschiedliche Speicher- bzw. Datenformate zum Einsatz. Als Beispiele sind STEP, IGES oder STL zu nennen (Cai & Zhou 2011).

Für die nachfolgende Weiterverarbeitung der Eingangsdaten wird die Repräsentation der 3D-Objektoberfläche in Form einer Punktwolke vorausgesetzt. Hierzu eignet sich

insbesondere das STL-Format, welches die Objektgeometrie mithilfe von Dreiecksnetzen mit Angabe des Normalenvektors abbildet (Cai & Zhou 2011). Da die Konvertierung in andere Speicherformate durch zahlreiche, bereits bestehende Tools und Algorithmen abgedeckt werden kann, wird die Konvertierung des CAD-Modells in Form von beliebigen Speicherformaten zu STL im Folgenden als gegeben vorausgesetzt. Mit der Vorgabe einer gewünschten Punktedichte kann durch die Auswahl von zufälligen Punkten auf dem Dreiecksnetz das Sampling (Generierung der Punktwolke) erfolgen.

Hidden Point Removal

Nach der Generierung der Punktwolke aus der STL-Datei enthält diese neben den außen sichtbaren Punkten auch innere, nicht sichtbare Punkte, die die inneren Oberflächen des Referenzmodells abbilden. Eine beispielhafte Darstellung der äußeren und inneren Punkte des Referenzmodells zeigt Abbildung 5–8 (links). Da bei der 3D-Bildaufnahme des realen Objekts ausschließlich die Oberflächenpunkte der sichtbaren Außengeometrie erfasst werden, sind die inneren Punkte des Referenzmodells für die nachfolgenden Registrierungsschritte nicht erforderlich und könnten sich zudem nachteilig auf die Recheneffizienz auswirken. Daher müssen sie entfernt werden. Für diesen Fall kann der Hidden Point Removal-Algorithmus nach (Katz et al. 2007) herangezogen werden, um die sichtbaren Punkte zu extrahieren und die inneren zu entfernen. Im ersten Schritt findet eine sphärische Spiegelung der vorliegenden Punktwolke P an einer Kugeloberfläche (mit Mittelpunkt C und Radius r) statt (vgl. Abbildung 5–6, links). Nach der Transformation liegt die Punktwolke \hat{P} vor.

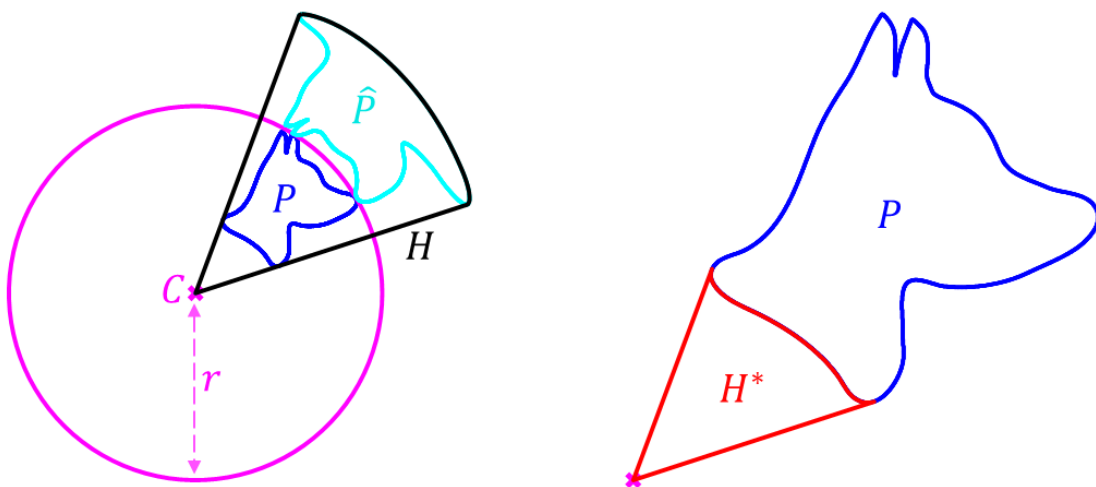


Abbildung 5–6: Exemplarische Darstellung (links) der sphärischen Spiegelung der blauen Punktwolke sowie (rechts) der Rückprojektion der konvexen Hülle in Anlehnung an (Katz et al. 2007)

Für die gespiegelte Punktwolke \hat{P} kann im zweiten Schritt eine konvexe Hülle H (vgl. Abbildung 5–6, links, schwarze Linie) berechnet werden, welche sowohl \hat{P} als auch C beinhaltet. Alle Punkte auf \hat{P} , welche auch auf der konvexen Hülle H liegen, beschreiben nach der sphärischen Rückprojektion die sichtbaren Punkte H^* (vgl. Abbildung 5–6, rechts, rote Linie).

Übertragen auf die vorliegende Problemstellung sind zur Ermittlung der sichtbaren Oberflächenpunkte des Referenzmodells die Sichtpunkte C_i erforderlich, welche die Basis für den Hidden Point Removal-Algorithmus darstellen. Hierbei ist sicherzustellen, dass die Sichtpunkte einen gewissen Abstand zum Referenzobjekt aufweisen, da ansonsten Verschattungen durch einen schrägen Winkel auftreten können. Wie in Abbildung 5–7 dargestellt, wird zur Bestimmung der Sichtpunkte angenommen, dass Batteriemodule einen quaderförmigen Aufbau besitzen, wie bereits in Kapitel 4.1.2 erläutert. Basierend darauf kann die Punktwolke P des Referenzmodells durch einen quaderförmigen Hüllkörper (engl.: Bounding-Box) – definiert als kleinstmöglicher Quader, der P vollständig einschließt – umschlossen werden (in Abbildung rot markiert). Durch die Vorgabe eines Abstands zur Bounding-Box lassen sich aus deren Eckpunkten sechs Sichtpunkte ableiten, die eine gleichmäßige Erfassung der sichtbaren Oberflächenpunkte ermöglichen.

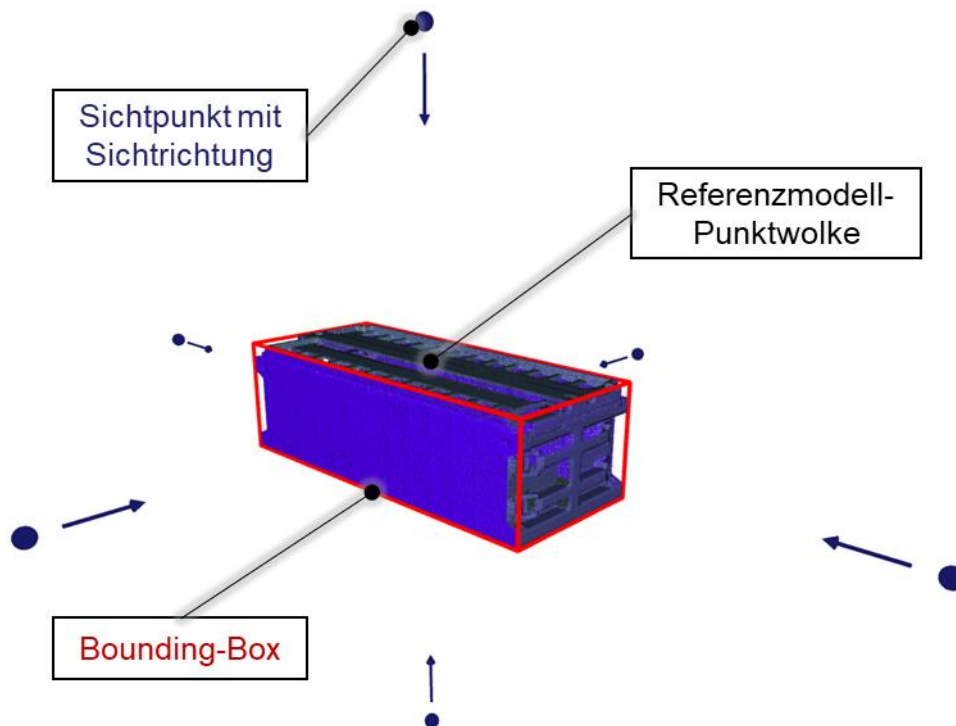


Abbildung 5–7: Bestimmung der sechs Sichtpunkte mithilfe der quaderförmigen Bounding-Box um das Referenzmodell in Anlehnung an (A_Enslin 2022)

Aufgrund des quaderförmigen Aufbaus des Referenzobjekts sowie der geringen Komplexität der Oberflächenstrukturen wird im Folgenden angenommen, dass die sechs Sichtpunkte für die vorliegende Problemstellung ausreichen. Anhand dieser Sichtpunkte können mit dem Hidden Point Removal-Algorithmus die sichtbaren Oberflächenpunkte des Referenzmodells ermittelt werden, wie exemplarisch in Abbildung 5–8 dargestellt.

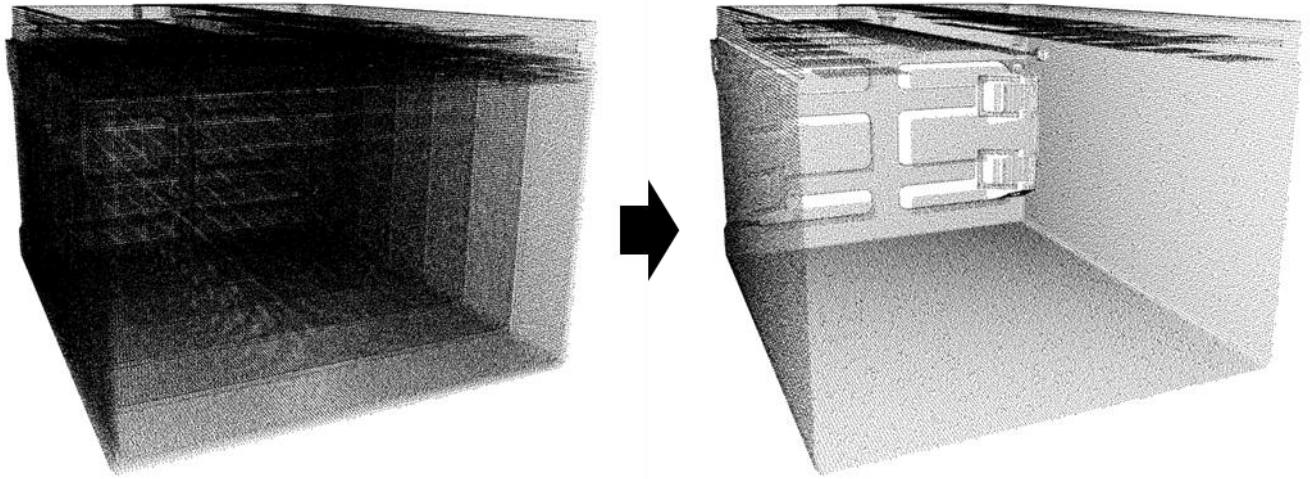


Abbildung 5–8: Punktwolke des Referenzmodells vor (links) und nach (rechts) der Anwendung von Hidden Point Removal

Normalenbestimmung

Voraussetzung für die Anwendung der Registrierungsansätze ist die Bestimmung der Normalenvektoren der Oberflächen-Punktwolke des Referenzmodells. Für jeden Punkt kann unter Berücksichtigung der umliegenden Punkte der Normalenvektor berechnet werden. Der Vektor kann nach innen oder außen (weg vom Referenzmodell) gerichtet sein. Zur eindeutigen Festlegung der Normalvektor-Richtung (nach außen) können die Sichtpunkte aus dem Hidden Point Removal-Algorithmus genutzt werden.

5.2.1.2 Referenzmodellerzeugung auf Basis von 3D-Bildaufnahmen des realen Objekts

Für den Fall eines fehlenden CAD-Modells kann die Referenzmodellerzeugung auf Basis von **3D-Bildaufnahmen des realen Objekts** erfolgen. Hierbei wird auf das Kapitel 5.2.2 verwiesen.

5.2.2 3D-Aufnahme

Bei der 3D-Aufnahme wird die Objektoberfläche des realen Objekts in Form einer Punktwolke aufgenommen. Bedingt durch den Aufbau der flexiblen Demontageanlage handelt es sich beim vorliegenden Anwendungsfall um ein stationäres 3D-Kamerasystem sowie um ein bewegliches Objekt (siehe Kapitel 5.1). Die (Dreh-)Bewegung des realen Objekts wird durch einen Drehtisch erzeugt, der eine visuelle 360 °-Zugänglichkeit für das 3D-Kamerasystem schafft. Dies ist erforderlich, da das bestehende 3D-Kamerasystem und das damit verbundene Messprinzip (Streifenlichtprojektion, siehe Kapitel 2.4.1) nur eine Aufnahme des Bildausschnitts, welches sich im Blickfeld der Kamera befindet, erzeugt. Um aus den einzelnen 3D-Aufnahmen ein vollständiges 3D-Bild des Objekts zu erhalten, müssen abwechselnd die beiden folgenden Prozessschritte (einschließlich der Teilschritte) durchlaufen werden:

(1) Bildaufnahme:

Bildaufnahme inklusive Drehbewegung → Skalierung → Grobsegmentierung
→ Ausreißer entfernen → Normalenbestimmung (vgl. Kapitel 5.2.1)
→ Downsampling

(2) Zusammenfügen:

Transformation → Feinsegmentierung → Downsampling

Im Folgenden wird näher auf die wesentlichen Teilschritte eingegangen.

Bildaufnahme inklusive Drehbewegung

Es findet eine Aufnahme des Batteriemoduls an der zur Kamera zugewandten Seite statt. Durch die Bewegung des Drehtisches können die Mantelflächen des Batteriemoduls von verschiedenen Seiten aufgenommen werden. Hinsichtlich der Bildaufnahme ist ein Kompromiss zwischen der Anzahl der Aufnahmen und der damit verbundenen Prozesszeit sowie der lückenlosen Erfassung der Objektmantelfläche zu finden. Durchgeführte Versuche, in denen die Anzahl und das Inkrement der Drehungen sowie die Schrägstellung der Kamera variiert wurden, zeigen, dass acht Aufnahmen mit senkrechter Ausrichtung der Kamera zur Drehachse den besten Kompromiss aus Zeit und Qualität für die Gesamtaufnahme darstellen (vgl. Abbildung 5–9, rechts). Aufnahmen von vier Seiten weisen hingegen eine unzureichende Qualität der zusammengesetzten 3D-Aufnahmen auf. Beispielsweise werden die Kanten an den Seiten nicht sauber

abgebildet oder es liegen Lücken aufgrund von Verschattung vor (vgl. Abbildung 5–9, links/Mitte).

Skalierung

Aufgrund unterschiedlicher existierender Maßstäbe bei 3D-Kamerasystemen sind gegebenenfalls Skalierungsoperationen erforderlich. Die Basis für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte bildet das metrische Einheitssystem.

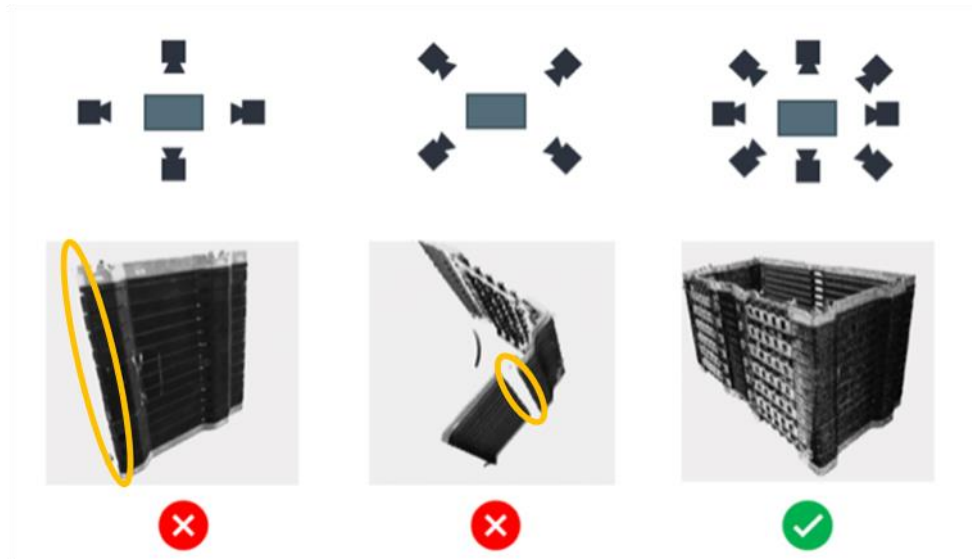


Abbildung 5–9: Variation der Kameraaufnahmen und resultierende Gesamtaufnahmequalität in Anlehnung an (A_Enslin 2022)

Segmentierung

Da sich im Erfassungsbereich der Kamera neben dem zu erfassenden Objekt (Batterieminus) weitere Objekte (wie Spannbacken des Spannsystems) befinden, liegen nach der 3D-Bildaufnahme neben der Punktwolke des gewünschten Objekts Punkte von störenden Objekten vor. Bei der *Grobsegmentierung* werden nach jeder Aufnahme die unerwünschten Punkte eliminiert: Hierzu wird eine Aufnahme der Systemumgebung ohne das Objekt durchgeführt. Auf Basis der Aufnahme kann ein Quader aufgespannt werden, welcher die Systemgrenze zwischen der Systemumgebung und dem zu erfassenden Objekt definiert.

Bei der *Feinsegmentierung* werden nach dem Zusammensetzen der einzelnen Bildaufnahmen zur gesamten 3D-Aufnahme die verbliebenen, störenden (Rausch-)Punkte entfernt. Dies erfolgt auf Basis des dichte-basierten Clusterverfahrens DBSCAN nach (Ester et al. 1996). Zusätzlich können die Spannbacken, welche das Batteriemodul von beiden Seiten einspannen, mittels Farbsegmentierung aus den 3D-Aufnahmen entfernt

werden. Hierzu müssen die Spannbacken mit einer definierten Farbe, welche sich deutlich von den Batteriemodulfarben unterscheidet, lackiert werden.

Ausreißer-Bereinigung

Bei der 3D-Bildaufnahme können z. B. durch Rauscheffekte beim Kamerasystem einzelne Punkte vorliegen, die eindeutig Ausreißer darstellen. Statistical outlier removal stellt einen Ansatz zur *Ausreißer-Bereinigung* dar: Liegen Punkte außerhalb der statistischen Normalverteilung vor, werden diese als Ausreißer gekennzeichnet und eliminiert.

Downsampling

Downsampling dient der Reduzierung der Punktwolkendichte, um den Rechenaufwand und die damit verbundene Rechenzeit zu verringern. Weiterhin erfordern einige Algorithmen die Sicherstellung einer konstanten Punktwolkendichte. Das Downsampling wird unter der Nutzung eines Voxelgitters definierter Größe durchgeführt: In jedem Voxel wird jeweils ein Punkt ausgewählt, der dem Mittelpunkt am nächsten ist. Die restlichen Punkte im Voxel werden eliminiert.

Transformation

Zum Zweck des Zusammenfügens der einzelnen Bildaufnahmen zu einer Gesamtaufnahme ist eine Transformation der Punktwolke jeder Bildaufnahme erforderlich. Ohne die Transformation der einzelnen Punktwolke würde sich eine überlappende Gesamtaufnahme ergeben, wie es in Abbildung 5–10 (links) ersichtlich ist. Im Speziellen müssen die Bildaufnahmen um die Rotationsachse des Drehtisches (z-Achse) um einen bekannten Drehwinkel θ_{TT} im Kamera-Koordinatensystem KOS_{CAM} rotiert werden. Nähere Informationen zur Kalibrierung, d. h. zur Bezugsherstellung zwischen den Koordinatensystemen der Kamera KOS_{CAM} , des Drehtisches KOS_{TT} sowie des Objekts KOS_{OBJ} sind in Kapitel 5.1.1 aufgeführt. Mit bekannter Transformationsmatrix M_{CAM}^{TT} (zwischen KOS_{CAM} sowie KOS_{TT}) und bekanntem Drehwinkel θ_{TT} kann die Transformation der aufgenommenen Punktwolken erfolgen.

Nach mehrmaligem Durchlaufen aller Prozessschritte liegt eine 3D-Aufnahme des Batteriemoduls vor, welches beispielhaft in Abbildung 5–10 (rechts) illustriert ist. Die Abbildung zeigt gleichzeitig die Grenzen des gezeigten Ansatzes auf: Es sind nur 3D-Aufnahmen der Mantelfläche des Batteriemoduls möglich. Eine vollständige Aufnahme der Einspannfläche des Batteriemoduls ist aufgrund der Verdeckung durch die

Spannbacken des Spannsystems nicht möglich. Da sich die im Rahmen der vorliegenden Arbeit fokussierte Fügeverbindung (Zellkontaktierungen), bedingt durch den topologischen Aufbau des Batteriemoduls, auf der Mantelfläche befindet (siehe Kapitel 4.1.2), ist die beschriebene Einschränkung vertretbar.

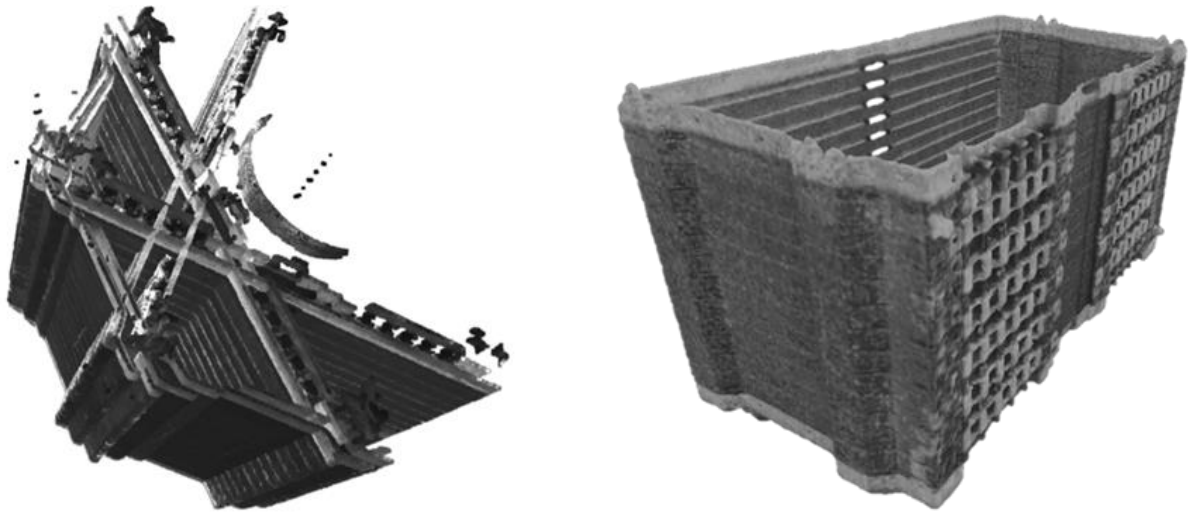


Abbildung 5–10: (links) Zusammengefügte Gesamtaufnahme ohne Transformation der einzelnen Punktwolken, (rechts) erfolgreich zusammengefügte 3D-Aufnahme eines Batteriemoduls (A_Enslin 2022; Gerlitz et al. 2023a)

5.2.3 Registrierung und Punktlokalisierung

Die Registrierung stellt einen elementaren Schritt für den geometrischen Abgleich zwischen dem Referenzmodell (CAD-Modell oder 3D-Aufnahme) und der 3D-Aufnahme des realen Objekts dar. Das Ziel ist, wie anfangs beschrieben, Korrespondenzen zwischen prozessrelevanten Stützpunkten des Referenzmodells und den entsprechenden Punkten in der 3D-Aufnahme des realen Objekts zu finden. Im Kontext der industriellen Demontage ist neben der geforderten hohen Genauigkeit eine möglichst geringe Verarbeitungszeit der einzelnen Operationen zur Minimierung der Taktzeit wünschenswert. Hierbei gilt es, einen Kompromiss zwischen beiden konträren Anforderungen zu finden.

Die starre Registrierung bezeichnet die räumliche Ausrichtung des Referenzmodells zur 3D-Aufnahme durch die Translations- und Rotationsoperation, sodass eine möglichst hohe Überlappung beider Modelle vorliegt. Da, wie bereits in Kapitel 4.1.4 erläutert, geometrische Verformungen insbesondere in Stapelrichtung vorliegen, ist neben der starren Registrierung auch die nicht-starre Registrierung erforderlich, bei der zusätzlich die Verformung geschätzt wird. Für nähere Informationen zur Registrierung

wird auf Kapitel 2.4.1 verwiesen. Die gesamte Registrierung für die vorliegende Problemstellung kann in folgende Schritte unterteilt werden:

(1) Starre Registrierung:

Downsampling (vgl. Kapitel 5.2.2) → Starre Registrierung inklusive Merkmalsbestimmung sowie Korrespondenzpunktfindung

(2) Nicht-starre Registrierung:

Downsampling (vgl. Kapitel 5.2.2) → Nicht-starre Registrierung inklusive Interpolation

Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Teilschritte eingegangen:

Starre Registrierung inklusive Merkmalsbestimmung sowie Korrespondenzpunktfindung

Für die starre Registrierung zur räumlichen Grobausrichtung der Punktwolke des Referenzmodells zum realen Objekt wird auf TEASER++ nach (Yang et al. 2021) gesetzt. Durch die Formulierung des Registrierungsproblems als Minimierung der truncated least squares (dt.: abgeschnittene kleinste Quadrate) ist eine Robustheit gegenüber Störungen, wie geometrische Abweichungen zwischen Modell und Realität aufgrund beispielsweise fehlender Oberflächenkomponenten, gegeben. Zur Ausrichtung beider Punktwolken sind signifikante Merkmale, welche in beiden Modellen vorzufinden sind, erforderlich. Beim Merkmal wird auf FPFH-Deskriptoren (Fast Point Feature Histograms) nach (Rusu et al. 2009) gesetzt. Als Hyperparameter muss der Kugelradius, welcher die umliegenden Punkte zur Berechnung des Merkmals miteinschließt, vorgegeben werden.

Mit den berechneten Merkmalen kann im Merkmalsraum die Nächste-Nachbar-Suche erfolgen, welche die Grundlage für die Korrespondenzpunktfindung zwischen den Punkten der beiden Punktwolken ist. Zur Beschleunigung wird die Speicherung in Form eines K-d-trees gesetzt. Das Ergebnis der starren Registrierung stellt eine homogene Transformationsmatrix im Kamerakoordinatensystem KOS_{CAM} dar, welches angewandt auf das Referenzmodell die Position und Orientierung des realen Objekts ergibt. Den Hyperparameter bei der Registrierung stellt die Voxelgröße dar, welche durch Downsampling angepasst werden kann.

Nicht-starre Registrierung inklusive Interpolation

Zur Schätzung der geometrischen Verformung wird eine nicht-starre Registrierung durchgeführt. Es wird der BCPD-Algorithmus (Bayes Coherent Point Drift) nach (Hirose 2021a) angewandt, welcher ein Wahrscheinlichkeitsdichte-basiertes Registrierungsverfahren darstellt. BCPD bietet im Vergleich zu CPD (Coherent Point Drift) und TPS (Thin-Plate Spline) eine höhere Robustheit gegenüber Rauschen, erhält lokale Strukturen besser und erlaubt eine flexible Anpassung der Verzerrungsstärke.

Durch den Einsatz von K-d-tree sowie der Nyström-Methode wird beim BCPD die Rechenzeit stark verkürzt. Eine weitere Verkürzung der Rechenzeit kann durch die Nutzung einer Teilmenge der Punktwolke mit anschließender Interpolation erzielt werden, dies ist in BCPD++ umgesetzt (Hirose 2021b). Einstellbare Hyperparameter für BCPD++, eine Erklärung sowie Erfahrungswerte sind in Tabelle 5-2 aufgeführt.

Tabelle 5-2: Hyperparameter in BCPD++ in Anlehnung an (A_Enslin 2022)

Hyperparameter	Erklärung	Eingestellter Wert (Erfahrungsbasiert)
Ausreißerwahrscheinlichkeit	Prozentzahl der Punkte, welche in beiden Modellen vorkommen können	10 %
Länge der Verformungsvektoren	Zulässige maximale Verformung	Einige cm
Anfangsinitialisierung	Anfangspositionierung und -orientierung des 3D-Modells	Nach Ablauf von TEASER++ gegeben
Kernel	Eingesetzte Kernel-Funktion (z. B. Laplace, Gauß)	Gauß-Kernel
Beta (Kernel)	Maß für maximale Glättung des Verformungsvektors	~ 5
Konvergenzgrenze	Bedingung für die Terminierung des Algorithmus	10^{-6}
Downsampling	Reduzierung der Punktwolkendichte	~ 20 %

Das Ergebnis nach der nicht-starren Registrierung stellt bei Vorgabe von Punkten p_x^{OBJ} (Objekt-KOS KOS_{OBJ}) im Referenzmodell eine Liste an lokalisierten Punkten p_x^{CAM} (Kamera-KOS KOS_{CAM}) mit $x = 1..n$ (n = Anzahl der Punkte) am realen 3D-Objekt dar. Die vorgegebenen Punkte p_x^{OBJ} repräsentieren die Stützpunkte für die Werkzeugbahn,

welche automatisiert in der Bahnplanung ermittelt werden. Abbildung 5–11 veranschaulicht die Punktlokalisierung.

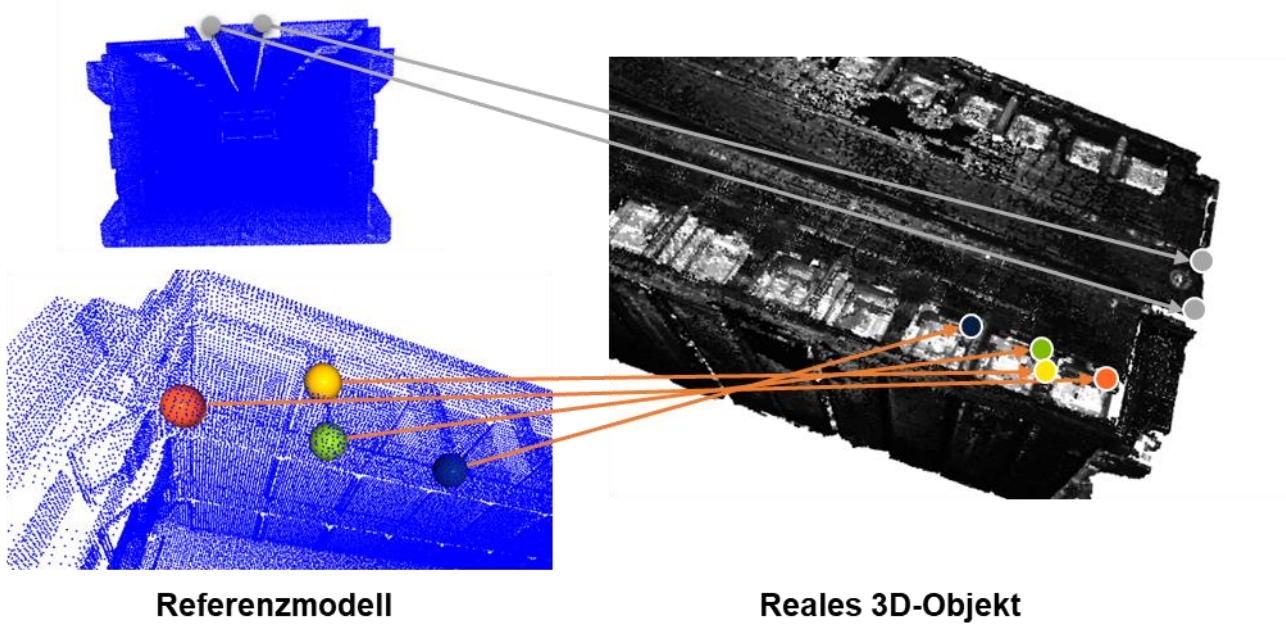


Abbildung 5–11: Exemplarische Darstellung der Punktlokalisierung an vier Beispielpunkten in Anlehnung an (A_Enslin 2022; Gerlitz et al. 2023a)

5.2.4 Transformation

Die starre sowie nicht-starre Registrierung mit anschließender Punktlokalisierung in Kapitel 5.2.3 erfolgt im Kamera-Bezugssystem KOS_{CAM} . Da der Roboter im Bezugssystem KOS_{ROB} operiert, müssen die lokalisierten Punkte p_x^{CAM} (KOS_{CAM}) mit $x = 1..n$ (n = Anzahl der Punkte) in das KOS_{ROB} gemäß folgender Beziehung transformiert werden:

$$p_x^{ROB} = p_x^{CAM} (M_{CAM}^{ROB})' \quad 5-3$$

Die Berücksichtigung der aktuellen Drehtisch-Winkelstellung θ_{TT} erfolgt durch die

1. Transformation der Punkte p_x^{CAM} in KOS_{TT} $\rightarrow p_x^{TT}$
2. Drehung p_x^{TT} um bekannten Winkel θ_{TT} $\rightarrow p_x^{TT,*}$
3. Rücktransformation der gedrehten Punkte $p_x^{TT,*}$ in KOS_{CAM} $\rightarrow p_x^{CAM,*}$

Bei den beschriebenen Transformationen wird vorausgesetzt, dass eine Kalibrierung nach Kapitel 5.1 erfolgt ist und M_{CAM}^{ROB} sowie M_{CAM}^{TT} bekannt sind.

5.3 Validierung der Verarbeitungspipeline

Im vorliegenden Kapitel wird auf die Validierung der Verarbeitungspipeline eingegangen. Der Fokus liegt auf der erfolgreichen Punktlokalisierung, der erzielten Genauigkeiten und der erforderlichen Verarbeitungszeiten. Zunächst werden der Versuchsaufbau sowie die Validierungsmethodik beschrieben. Weiterhin werden die Validierungsergebnisse vorgestellt und Optimierungspotenziale erörtert. Die Validierung wurde im Rahmen der Thesis (A_Enslin 2022) durchgeführt und ist im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

5.3.1 Versuchsaufbau und Validierungsmethodik

Ein Foto des Versuchsaufbaus für die Validierung zeigt Abbildung 5–12. Darin sind das stationäre 3D-Kamerasystem, ein Validierungs-Batteriemodul sowie der verwendete Prototyp eines Drehtisches zu sehen.

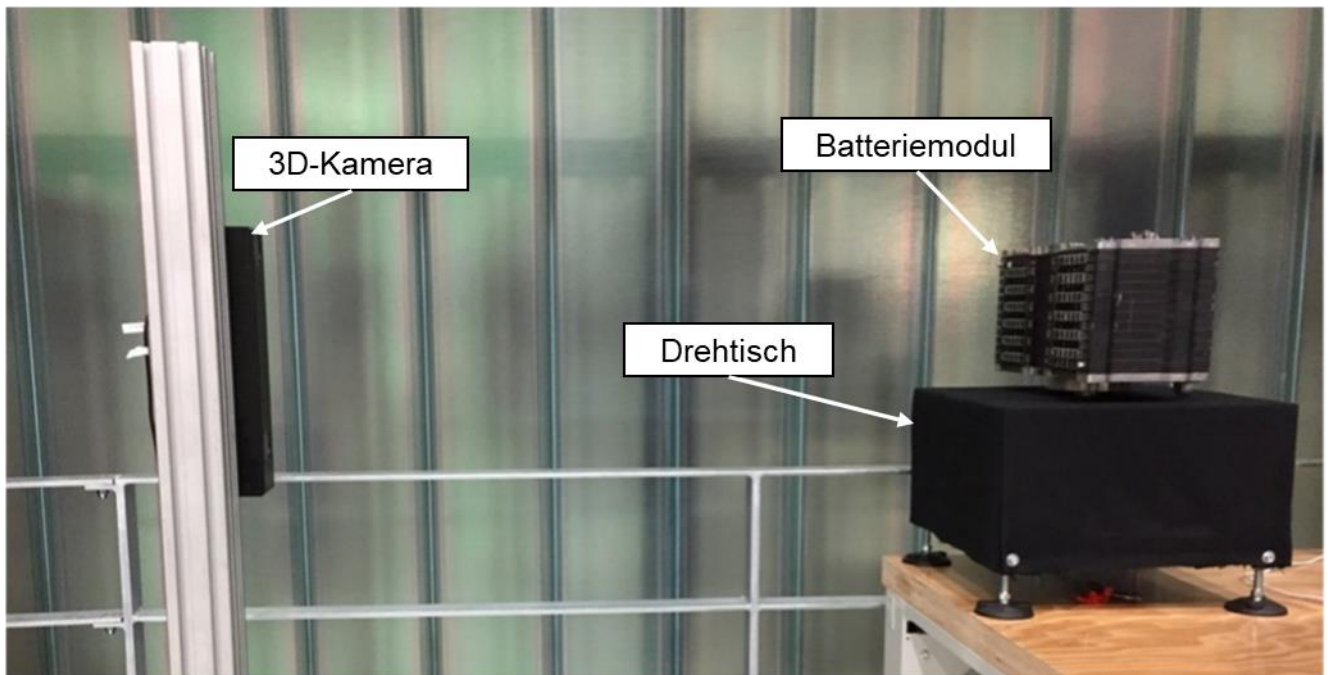


Abbildung 5–12: Versuchsaufbau für die Validierung der Verarbeitungspipeline mit Batteriemodul 1 in Anlehnung an (A_Enslin 2022)

Als Validierungsobjekte kamen zwei Batteriemodule mit unterschiedlichem Aufbau und verschiedenen Eigenschaften zum Einsatz. Ihre Charakteristika sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst. Abbildung 5–13 zeigt die beiden eingesetzten Batteriemodule sowie die Hauptstapelachse (blau markiert).

Tabelle 5-3: Eingesetzte Batteriemodul und deren Eigenschaften

Batterie-modul	Aufbau	Dicken-verstellung	Referenzmodell-erzeugung
1	Pouchzellen mit Zell-rahmen	möglich	3D-Aufnahme des realen Objekts
2	Prismatische Zellen als Stapel	nicht möglich	CAD-Modell

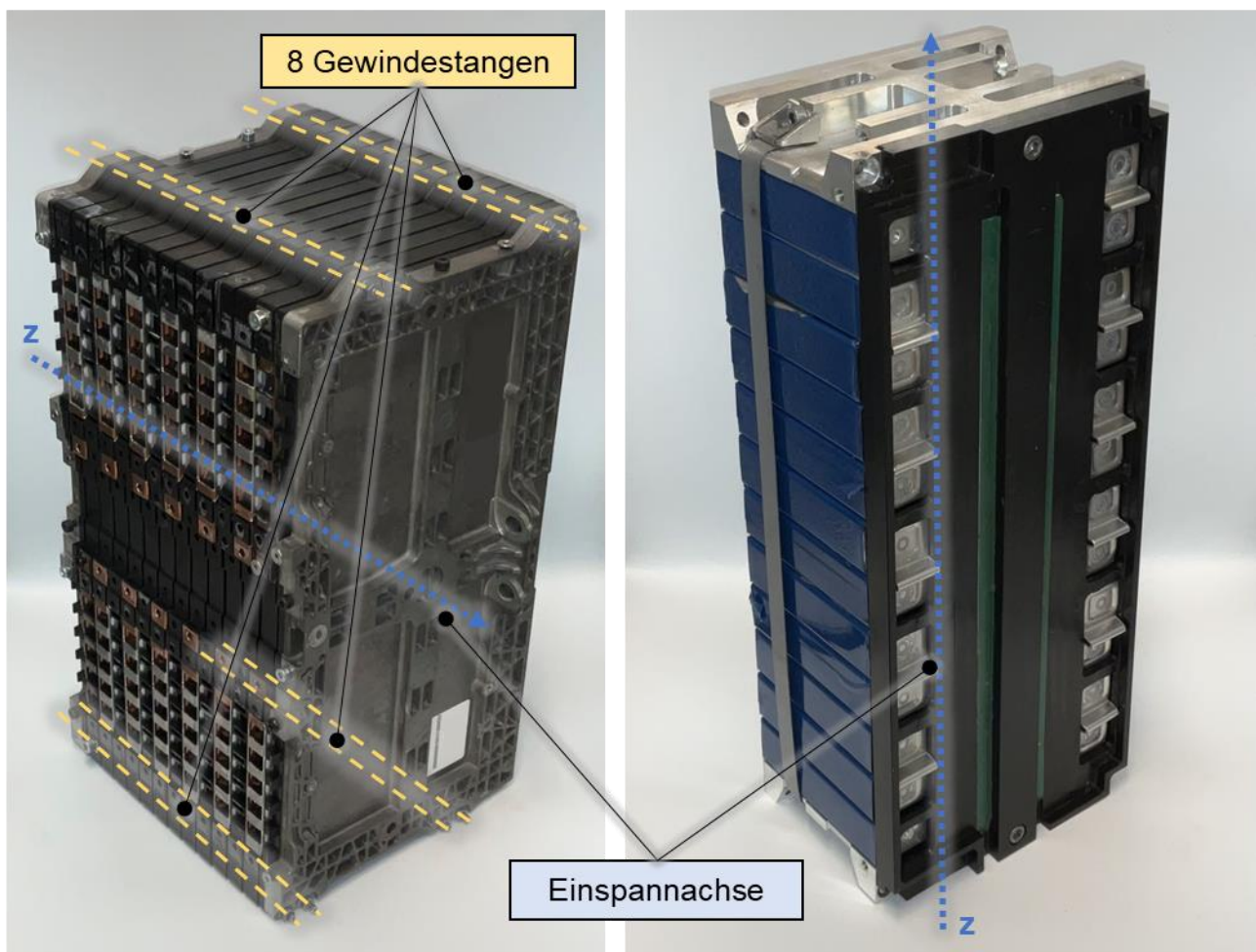


Abbildung 5–13: (links) Batteriemodul 1 und (rechts) Batteriemodul 2

Bei Batteriemodul 1 wurden die echten Batteriezellen entnommen, während bei Batteriemodul 2 die Lithium-Ionen-Zellen durch Dummy-Zellen mit Ersatzfüllmaterial ersetzt wurden. Aufgrund fehlender Sicherheitsvorkehrungen für den Umgang mit aktiven Lithium-Ionen-Zellen sowie der von ihnen ausgehenden Gefahren (vgl. Kapitel 4.1.5) waren diese Maßnahmen erforderlich. Da für die kamerabasierte Verformungserfassung die Außengeometrie des Demontageobjekts entscheidend ist und diese bei den

eingesetzten Batteriemodulen – sowohl mit entnommenen als auch mit Dummy-Zellen – unverändert bleibt, wird die Aussagekraft der Untersuchung nicht beeinträchtigt. Aus diesem Grund sind die beschriebenen Maßnahmen vertretbar.

Bei Batteriemodul 1 kann die Moduldicke mithilfe der acht Gewindestangen variiert werden. Diese Möglichkeit wird in den folgenden Validierungsuntersuchungen genutzt, indem die Dicke um mehrere Zentimeter verändert und anschließend eine Punktlokalisierung durchgeführt wird.

Die Genauigkeitsermittlung wird mittels Ground-Truth-Ansatz durchgeführt: Hierzu wurden markante Punkte sowohl in der Referenzpunktwolke als auch in der Punktwolke des realen Objekts ausgewählt. Nach der Punktlokalisierung erfolgt die Berechnung der Abweichungen zwischen Ground-Truth-Punkten sowie den lokalisierten Punkten durch Bestimmung des euklidischen Abstandes. Die Gesamtabweichung bildet sich durch Mittelung aller Einzelabweichungen. Mögliche Fehlerquellen, welche sich auf die Genauigkeitsbestimmung auswirken können, sind: (1) Diskretisierungsfehler bei der Punktwolke, (2) starke (lokale) Abweichung zwischen CAD-Modell und realem Objekt und (3) (subjektive) Auswahl der Punkte durch Benutzer.

Eine Laufzeitmessung wurde jeweils für die Verarbeitungspipeline-Schritte (I) Vorverarbeitung, (II) Zusammenfügen, (III) starre Registrierung und (IV) nicht-starre Registrierung durchgeführt. Die eigentliche Bildaufnahme sowie Drehbewegung sind hierbei ausgenommen. Für die drei Szenarien (A) geringe Laufzeit, (B) Kompromiss sowie (C) hohe Genauigkeit wurden drei verschiedene Parameterkombinationen eingestellt, wobei der ausschlaggebende Parameter die Punktwolkendichte ist. Die Datenverarbeitung lief auf einem Rechner mit AMD Ryzen 7 3800x 8-core 3.9 GHz (Prozessor), DDR4-3200 64 GB (Arbeitsspeicher), GeForce RTX 3080 Gaming OC 10 GB (Grafikkarte) sowie Linux 20.04 LTS (Betriebssystem).

5.3.2 Ergebnisse und Optimierungspotenziale

Sowohl bei Batteriemodul 1 als auch -modul 2 konnten alle ausgewählten Punkte erfolgreich (trotz Dickenschwankung bei Batteriemodul 1 von mehreren Zentimetern) lokalisiert werden, was mit einer Trefferquote von 100 Prozent gleichzusetzen ist.

Des Weiteren konnten Punktlokalisierungs-Genauigkeiten von

- 1,35 mm (*hohe Genauigkeit*) bis 2,10 mm (*geringe Laufzeit*) bei Modul 1 und
- 1,60 mm (*hohe Genauigkeit*) bis 2,60 mm (*geringe Laufzeit*) bei Modul 2

erzielt werden.

Es wurden bei der Datenverarbeitung Gesamtlaufzeiten von

- 6,05 s (*geringe Laufzeit*) bis 14,01 s (*hohe Genauigkeit*) bei Modul 1 und
- 3,06 s (*geringe Laufzeit*) bis 16,55 s (*hohe Genauigkeit*) bei Modul 2

gemessen.

Eine tabellarische Zusammenfassung der einzelnen Laufzeiten und der Gesamtlaufzeit sowie der erzielten Punktlokalisierungs-Genauigkeiten ist in Tabelle 5-4 aufgeführt. Es lässt sich dabei festhalten, dass höhere Genauigkeiten beim Batteriemodul 1 erzielt werden können. Dies lässt sich auf die Tatsache zurückführen, dass größere (lokale) geometrische Unterschiede zwischen Referenzmodell und realem Objekt bei Batteriemodul 2 bestehen, insbesondere Unterschiede bei der Busbar. Weiterhin können geringere Laufzeiten bei Batteriemodul 2 (bis auf Szenario *(III)* *hohe Genauigkeit*) aufgrund einer geringeren Manteloberfläche und folglich kleinerer Punktwolke festgestellt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei beiden Batteriemodulvarianten alle ausgewählten Punkte (trotz Dickenschwankung bei Batteriemodul 1 um mehrere cm) mit einer Genauigkeit unter 2 mm sowie einer Laufzeit unter 10 s im Szenario *(II)* *Kompromiss* lokalisiert werden konnten. Hierbei sei angemerkt, dass Fehlerquellen, wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, sich negativ auf die Genauigkeitsmessungen auswirken können. Das heißt, die tatsächlich erzielbare Punktlokalisierungs-Genauigkeit kann somit höher liegen.

Die Funktionsweise der erarbeiteten Verarbeitungspipeline für den vorliegenden Anwendungsfall konnte durch die Validierungsversuche nachgewiesen werden. Zudem wurde eine erste quantitative Evaluierung der Pipeline unternommen, um deren

Leistungsfähigkeit zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass die Algorithmen gezielt ausgewählt und aufeinander abgestimmt wurden, sodass die industrielle Einsatzfähigkeit der Pipeline gegeben ist. Sie weist eine kurze Verarbeitungszeit bei gleichzeitig hoher Genauigkeit auf.

Tabelle 5-4: Ermittelte Laufzeiten und Genauigkeiten für Batteriemodul 1 und 2 in Anlehnung an (A_Enslin 2022; Gerlitz et al. 2023a)

	Batteriemodul 1			Batteriemodul 2		
Szenario	(I)	(II)	(III)	(I)	(II)	(III)
Anzahl Punkte	300.000			75.000		
Vorverarbeitung [s]	1,09			0,45		
Zusammenfügen [s]	0,95			0,26		
starre Registrierung [s]	0,90	1,68	2,10	0,28		
nicht-starre Registrierung [s]	3,11	5,10	9,87	2,07	3,64	15,56
Gesamtlaufzeit [s]	6,05	8,82	14,01	3,06	4,63	16,55
Genauigkeit [mm]	2,10	1,54	1,35	2,60	1,85	1,60

(I) geringe Laufzeit, (II) Kompromiss, (III) hohe Genauigkeit

6 Qualifizierung des Trennprozesses

Im vorliegenden Kapitel werden Untersuchungen mit Hinblick auf den Trennprozess der Zellkontaktierung mittels Fräsen zum Zweck der Prozessqualifizierung vorgestellt. Der Fokus liegt auf der Wahl einer passenden Zerspanungsstrategie zum Zerspanen von Aluminiumblechen der Spezifikation AW1050A-H14 (Alu99,5) sowie auf der Absicherung hinsichtlich kritischer, produktbezogener Größen, wie maximal erlaubte Kraft, Temperaturmaximum sowie kritische Spanlänge. Weiterhin werden die kinematischen Randbedingungen sowie Einschränkungen durch den 6-Achs-Knickarmroboter näher betrachtet.

Werkzeugverschleiß wird im Folgenden nicht betrachtet, da der Fokus auf der Prozessbeherrschung und nicht auf der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegt. Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erläutert wurde, weist das Zerspanen eine sehr starke Werkstoffabhängigkeit auf, was die folgenden Untersuchungen erfordert. Die Qualifikation des Fräsprozesses findet in einer definierten Versuchsumgebung (siehe Kapitel 6.1.2) statt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen werden auf die flexible Demontageanlage übertragen.

6.1 Definition der Zerspanungsstrategie

Nachfolgend werden alle wesentlichen Randbedingungen für den Zerspanungsprozess als Zerspanungsstrategie bezeichnet. Diese beinhalten das Werkzeug (und damit verbundene Werkzeugparameter), die Zerspanungsparameter sowie die Schnittbahn. Die durch den Anwendungsfall eingegrenzten Parameter werden in Kapitel 6.1.1 näher erläutert.

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 und 4.2.3 diskutiert, zeigt die ausgewählte Trennstrategie für diesen Anwendungsfall sehr große Ähnlichkeiten zum Planfräsen, umgesetzt mit einem Schaftfräser. Interaktionen bestehen insbesondere mit der Mantelfläche des Schaftfräasers und dem Werkstück, weshalb dies als Umfangsfräsen zur Ausbildung von Schlitzten einzustufen ist. Hier ist außerdem eine enge Verwandtschaft zum Vollnutfräsen zu konstatieren.

6.1.1 Eingrenzung der Werkzeug- und Prozessparameter

Alle relevanten Parameter für das Schaftfräsen, basierend auf (Klocke 2018), sowie eine Übersicht der jeweiligen Eingrenzungen sind in Tabelle 6-1 aufgeführt. Dieses Kapitel gibt die Begründungen für die genannten Eingrenzungen wieder. Die Ergebnisse zur Eingrenzung von Werkzeug- und Prozessparametern wurden im Rahmen von (A_Zöller 2023) erarbeitet.

Tabelle 6-1: Eingegrenzte Prozessparameter beim Schaftfräsen

Parameter		Eingrenzung
Werkzeug	(G) Durchmesser	> 2 mm
	(G) Schneidenlänge	>= Blechdicke
	(G) Schneidenanzahl	Möglichst niedrig
	(G) Drallwinkel (Neigungswinkel)	45-50 °
	(Sk) Einstellwinkel	= 90 °
	(Sk) Keilwinkel	Bestimmt durch Frei-/Spanwinkel
	(Sk) Freiwinkel	< 10 °
	(Sk) Spanwinkel	< 30 °
	(Sk) Eckenwinkel	Irrelevant
	(Sk) Eckenradius	Irrelevant
	(Sk) Schneidkantenpräparation	k. A.
	Schneidstoff	VHM, PKD
	Beschichtung	VHM: TiAlN, DLC
	Spanteiler	k. A.
Prozessparameter	Vorschubgeschwindigkeit	OFFEN
	Schnittgeschwindigkeit	120 – 480 m/min
	Schnitttiefe	= Blechdicke
Schnittstrategie (Schaftfräsen)	Gegen-/Gleichlaufräsen	Kombination aus beidem
	Schnittbahn	Lineare, einfache Schnittbahn
	Anschnitt	Seitlicher, gerader Anschnitt
weitere	Kühlschmierstoffe	Trocken, Druckluft

(G) = Geometrie, (Sk) = Schneidkante

Die *Schneidenlänge* ist so zu wählen, dass die erforderliche *Schnitttiefe*, welche der Blechdicke entspricht, umgesetzt wird. Weiterhin soll die Systemtoleranz des flexiblen Demontagesystems (siehe Kapitel 4.4), welche auf < 1 mm geschätzt wird, mitberücksichtigt werden. Da die Ecken des Fräasers im Idealfall nicht in Interaktion mit dem Werkstück beim Trennen stehen, sind die Parameter Eckenwinkel und Eckenradius irrelevant.

Kühlschmierstoffe (KSS) sollten im vorliegenden Fall aufgrund der gegebenen Gefahr eines elektrischen Kurzschlusses durch KSS möglichst vermieden werden. Wegen der klebenden Wirkung können z. B. elektrisch leitende Späne an der Oberfläche anhaften. Weiterhin sprechen mögliche Rückstände von KSS an den Batteriezellen und ungewollte Interaktionen mit nachfolgenden chemischen Recyclingprozessen gegen den Einsatz von KSS.

Zur trockenen Zerspanung von Aluminium kann als *Schneidstoff* Vollhartmetall (VHM) mit einer zusätzlichen *Beschichtung* aus DLC (engl.: diamond-like-carbon) oder TiAlN (Titanaluminiumnitrid) zum Einsatz kommen. Alternativ kann Diamant als *Schneidstoff* beispielsweise in Form eines PKD-Fräasers (polykristalliner Diamant) genutzt werden. Da die Anschaffungskosten eines PKD-Fräasers ein Vielfaches über dem eines VHM-Fräasers liegen, werden PKD-Fräser nachfolgend nicht weiterverfolgt.

Grundsätzlich ist bei der Wahl der *Schneidenanzahl* ein Kompromiss zwischen Produktivität und Spantransport zu treffen. Bei der Zerspanung von niedriglegiertem bzw. reinem Aluminium mit einem duktilen Materialverhalten steht jedoch die konstante Spanabfuhr – und damit die Prozesssicherheit – klar im Vordergrund. Eine konstante Spanabfuhr ist von großer Bedeutung, um Anschmelzen bzw. Verkleben zu verhindern. Zwar ermöglicht eine höhere Schneidenanzahl bei gleichem Zahnvorschub höhere Vorschübe, doch geht dies auf Kosten des Spantransports. Daher ist bei Aluminium eine möglichst niedrige Schneidenanzahl (1 oder 2) zu wählen, um eine optimale Spanabfuhr sicherzustellen und Probleme wie Anschmelzen oder Verkleben zu vermeiden.

Der favorisierte zylindrische Schaftfräser weist einen *Einstellwinkel* $\kappa = 90^\circ$ auf, wie er gemäß (Klocke 2018) bei Eckfräsern beschrieben wird. Bei der Wahl des *Drallwinkels des Fräasers* (gleichzusetzen mit dem *Neigungswinkel* λ_s) ist ein Kompromiss zwischen verbesserter Spanabfuhr bzw. vermindertem Werkzeugbruchrisiko (höherer Drallwinkel) und der Werkstückkonturgenauigkeit (niedriger Drallwinkel) zu treffen. Die Anforderung der konstanten Spanabfuhr (analog zur Wahl der Schneidenanzahl) bedingt die Wahl eines möglichst hohen Drallwinkels (im Bereich von 45° bis 50° für 2-schneidige Eckfräser).

Knetwerkstoffe geringer Festigkeit, worunter reines Aluminium (EN AW-1050A) zugeordnet werden kann, zeigen eine starke Neigung zur Aufbauschneidenbildung. Dies lässt sich durch höhere *Schnittgeschwindigkeiten* und größere *Spanwinkel* vermeiden. (Ostermann 2014)

Zur Zerspanung von Aluminiumlegierungen geringer Festigkeit beim Fräsen sind – analog zu den Angaben für das Drehen gemäß (Tönshoff 2010) – große *Spanwinkel* γ_n (bis 30°) und *Freiwinkel* α_n bis 10° geeignet. Ähnliche Werte können für die Zerspanung von reinem Aluminium verwendet werden. Der *Keilwinkel* $\beta_n = 90^\circ - \alpha_n - \gamma_n$ ist bei gegebenem *Freiwinkel* α_n und *Spanwinkel* γ_n definiert (Klocke 2018).

Spanteiler bzw. *-brecher* können, falls eine kritische Spanlänge überschritten wird, genutzt werden, sind jedoch nicht zwangsläufig erforderlich. Die Spanform und die damit verbundene kritische Spanlänge sind nach (Klocke 2018) u. a. abhängig von Prozessparametern wie der Schnittgeschwindigkeit und folglich durch diese beeinflussbar.

Wie bereits in Kapitel 4.2 erörtert, wird eine lineare *Schnittbahn* orthogonal zur Oberfläche der Busbar-Ebene zwischen beiden Zellpolen propagiert. Der erste Kontakt des Werkzeugs mit dem Material, der sogenannte *Anschnitt*, sollte vorzugsweise seitlich analog zum Nutenfräsen erfolgen. Im Kontrast dazu steht das Eintauchen von oben, bei dem das Werkzeug direkt senkrecht zur Werkstückoberfläche in das Material eintaucht. Von den beiden verfügbaren Anschnittstrategien beim Nutenfräsen, (1) Gerader sowie (2) Kreisbogenanschnitt, ist für eine erhöhte Werkzeugstandzeit der Kreisbogenanschnitt zu bevorzugen (Klocke 2018). Aufgrund des gegebenen flexiblen Demontagesystems (siehe Kapitel 4.4) und den damit verbundenen, geschätzten Systemgenauigkeiten im Millimeter-Bereich ist der Kreisbogenanschnitt jedoch nicht umsetzbar, weswegen der gerade Anschnitt erfolgt.

Der Beziehung $v_c = n * \pi * d_w$ ist zu entnehmen, dass der *Werkzeugdurchmesser* d_w bei konstanter Spindeldrehzahl n einen linearen Zusammenhang mit der Schnittgeschwindigkeit v_c hat. In Tabelle 6-2 sind für die maximale Spindeldrehzahl von $n_{max} = 24.000 \text{ U/min}$, wie sie in der vorliegenden Demontageanlage (vgl. Kapitel 4.4) vorzufinden ist, die maximal erreichbaren Schnittgeschwindigkeiten v_c für verschiedene Fräserdurchmesser aufgeführt.

Tabelle 6-2: Maximale Schnittgeschwindigkeiten für verschiedene Werkzeugdurchmesser bei maximaler Spindeldrehzahl $n_{max} = 24.000 \text{ U/min}$

Werkzeugdurchmesser d_w [mm]	Maximale Schnittgeschwindigkeiten (gerundet) $v_{c,max}$ [m/min]
2	151
3	226
4	302
5	377
6	452
8	603
10	754
12	905

In (Jaspers & Dautzenberg 2002) sind mögliche Schnittgeschwindigkeiten zwischen 120 und 480 m/min beim trockenen, ungekühlten Drehen von Al-Si1MgMn (EN AW6082-T6) zu finden. Insbesondere zur Vermeidung der Aufbauschneidenbildung sollte v_c höher als 100 m/min sein (Ostermann 2014). Vorzugsweise sollte ein Fräserwerkzeug mit einem größeren Durchmesser gewählt werden, sofern es die geometrischen Randbedingungen, gegeben durch das Batteriemodul, erlauben (insbesondere vorgegeben durch den Zellpolabstand). Die Wahl einer passenden Schnittgeschwindigkeit kann Werkzeuge mit kleinem Werkzeugdurchmesser ausschließen. Sind beispielsweise v_c bis 600 m/min erforderlich, müsste im vorliegenden Fall ein Fräser mit einem Durchmesser d_w von mind. 8 mm gewählt werden.

Weiterhin ist der Zahnvorschub f_z ein direktes Maß für die Produktivität, denn gemäß der Beziehung $v_f = n * f_z * z$ (Spindeldrehzahl n sowie Schneidenanzahl z) hat f_z eine lineare Beziehung mit der Vorschubgeschwindigkeit v_f .

An dieser Stelle ist zu betonen, dass Fräser mit kleinerem Durchmesser aufgrund ihrer schmalen Spankanäle eine eingeschränkte Spanabfuhr ermöglichen und sich leichter zusetzen. Dies führt zu einem reduzierten maximalen Zahnvorschub f_z und limitiert die Produktivität. Besonders bei Aluminium ist eine kontinuierliche Spanabfuhr essenziell. Daher sind Fräser mit kleinerem Durchmesser für diesen Anwendungsfall nicht zu empfehlen.

Für die gegebenen Randbedingungen zum Zerspanen definierter Bleche aus reinem Aluminium (EN-AW1050A) wurde ein geeigneter Fräser aus einer Menge von

möglichen, zur Verfügung stehenden Fräswerkzeugen ausgewählt. Die Spezifikation des favorisierten Fräasers (Garant VHM-Fräser) ist in Tabelle 6-3 aufgeführt. Weitere Informationen sind im Anhang 11.5 zu ersehen.

Tabelle 6-3: Spezifikation für den ausgewählten Fräser

Werkzeugparameter	Eingrenzung
Bezeichnung	Garant VHM-Fräser DIN 6535
Artikelnummer ³	201170 201270 (größere Schneidenlänge)
Werkzeugdurchmesser	4; 6; 8 mm
Schneidenlänge	(201170) 8; 10; 12 mm (201270) 11; 13; 19 mm
Schneidenanzahl	2
Drallwinkel (Neigungswinkel)	45 °
Einstellwinkel	90 °
Schneidstoff	VHM
Beschichtung	DLC
Spanteiler	keine

Folgende Parameter mit signifikantem Einfluss auf den Fräsprozess sind für den vorliegenden Anwendungsfall unter den gegebenen Randbedingungen durch nachfolgende experimentelle Versuchsreihen einzugrenzen:

- (1) Werkzeugdurchmesser d_w
- (2) Zahnvorschub f_z
- (3) Schnittgeschwindigkeit v_c

An die Parameter (2) und (3) besteht demnach die Anforderung, dass diese während des gesamten Zerspanungsprozesses konstant gehalten werden. Somit sind die drei genannten Parameter während der Zerspanung unverändert.

³ <https://www.hoffmann-group.com/>

6.1.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Nachfolgende Ergebnisse wurden im Rahmen der Untersuchungen von (A_Zöller 2023) erarbeitet und werden zusammengefasst wiedergegeben.

Der in der Prozessuntersuchung genutzte Prüfstand ist in Abbildung 6–1 ersichtlich. Dieser besteht aus einer Portalfräsmaschine mit einer Hochfrequenz-Spindel (ISO30-Aufnahme) sowie mit dem dazugehörigen Bedienpult für die Steuerung. Im Arbeitsraum der Maschine ist eine Kraftmessplatte (piezoelektrisches Mehrkomponenten-Dynamometer) zur Messung der Kräfte in drei Dimensionen platziert. Die Signale werden von einem Kraftmessverstärker mit jeweils einer Einheit pro Dimension verstärkt. Die Wandlung in ein digitales Signal erfolgt durch einen USB-Datenlogger. Die verstärkten und digitalisierten Signale werden von einem Messrechner mit der Software MATLAB gelesen, verarbeitet und gespeichert. Bei der Kraftmessung wird von einer Messunsicherheit u_F von 3,5 N ausgegangen. Aufgrund konstanter klimatischer Bedingungen in der Versuchshalle ist der Temperatureinfluss vernachlässigbar.

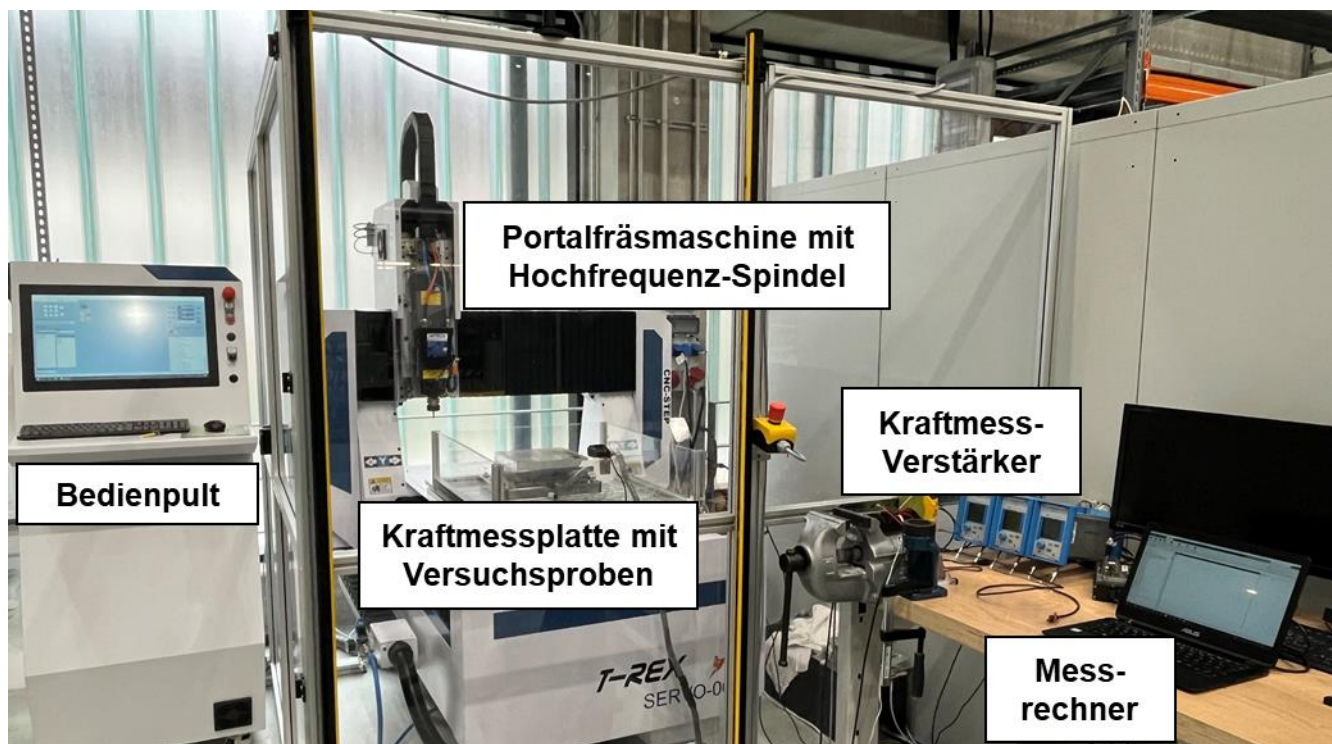


Abbildung 6–1: Prüfstand für Prozessuntersuchungen in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

Auf der Kraftmessplatte ist eine Adapterplatte mit Nuten zur Aufnahme von drei Probe-
stücken in Form von zu fräsenden Opferblechen definierten Formates (260 mm x
80 mm) und Befestigungsbohrungen in den Blechen (vgl. Abbildung 6–2) montiert.

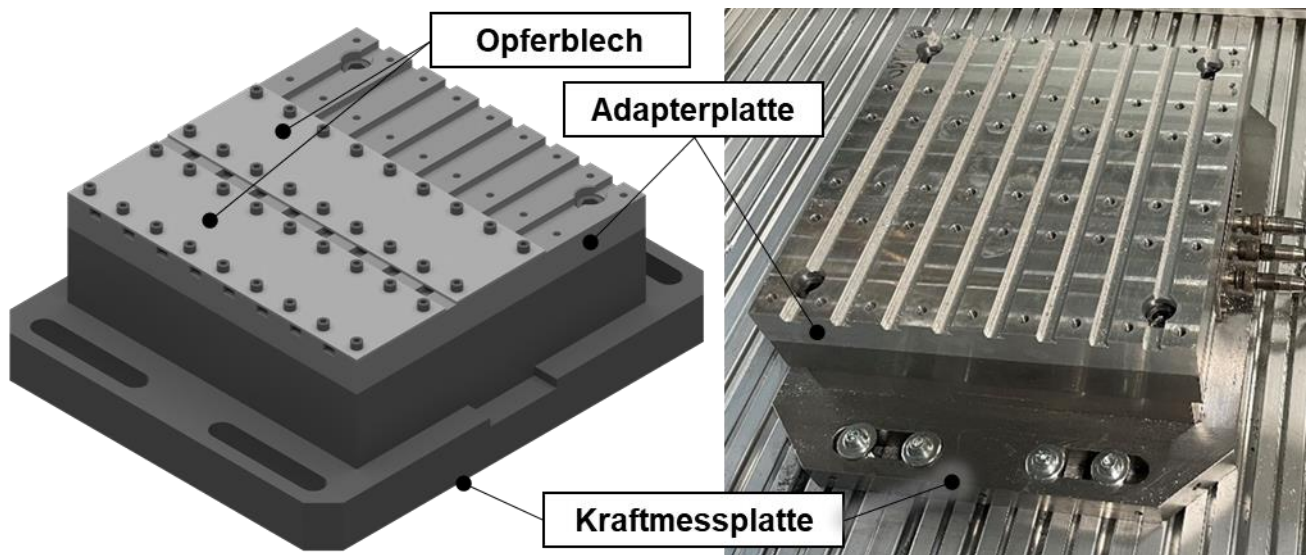


Abbildung 6–2: Versuchsaufbau, bestehend aus montierten Opferblechen auf Adapterplatte und Kraftmessplatte

Für die Untersuchung der Temperaturentwicklung ist auf der Adapterplatte zur Wärmeisolation zusätzlich ein mehrschichtiges Isolier- und Kaptonband aufgebracht (vgl. Abbildung 6–3). Zur Befestigung der Temperatursensoren auf der Opferplatte sind kleine Senkbohrungen im Abstand von 3 mm zur äußeren Schnittkante und jeweils 25 mm zur Kante des Fräsbeginns bzw. zum Fräsende eingebracht. Die Fixierung der Sensoren, welche mittels Wärmeleitpaste thermisch an das Opferblech angebunden sind, erfolgt über handelsübliches Klebeband. Als taktile Temperatursensoren kommen Thermoelemente des Typs K zum Einsatz. Die Signale werden von einem separaten Temperatur-Datenlogger digitalisiert und vom Messrechner analog zu den Kraftsignalen gelesen und verarbeitet. Die Versuche erfolgen ohne jegliche Art von Kühlung (z. B. Druckluftkühlung). Bei der taktilen Temperaturmessung kann bei der vorliegenden Messkette von einer Messunsicherheit u_T von 2,5 K ausgegangen werden.

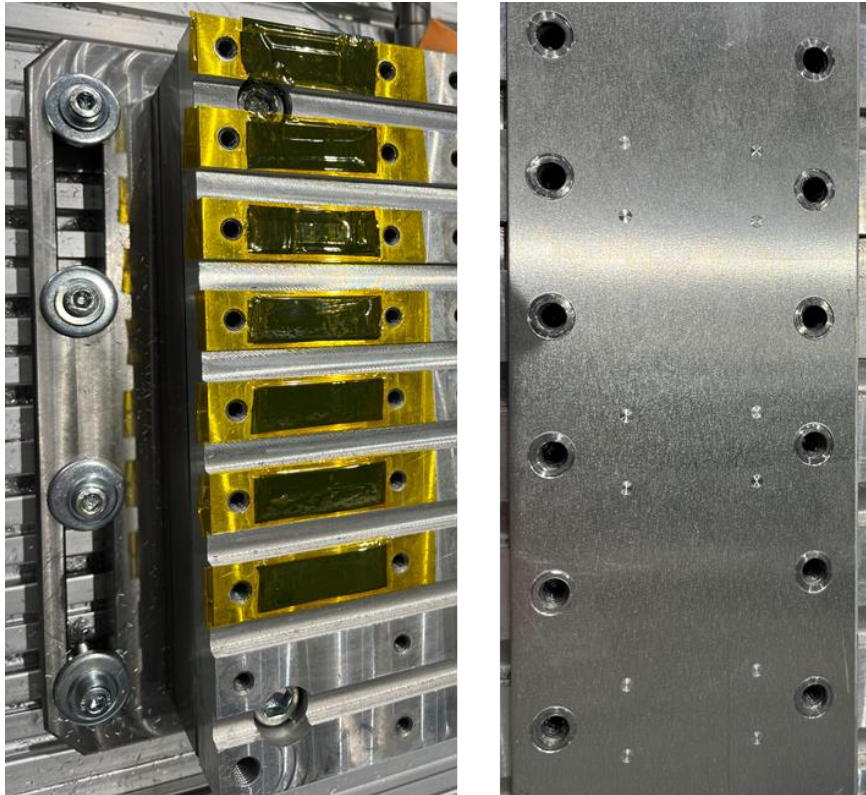


Abbildung 6–3: Aufgebrachtes Isolier- und Kaptonband (links) zur Wärmeisolation auf der Adapterplatte und eingebrachte Senkbohrungen (rechts) als Befestigungspositionen für die Thermoelemente (A_Zöller 2023)

Die Versuchsdurchführung gliedert sich in drei Phasen (vgl. Abbildung 6–4): Der Fräser taucht neben dem Blech in die Startposition ein (1), wobei kein Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück besteht. Beim seitlichen Anschnitt – dem ersten Kontakt des Werkzeugs mit dem Werkstück – beginnt der Fräsvorgang (2). Nach Vollendung des linearen Trennschnitts erfolgt der Rückzug des Werkzeugs (3).

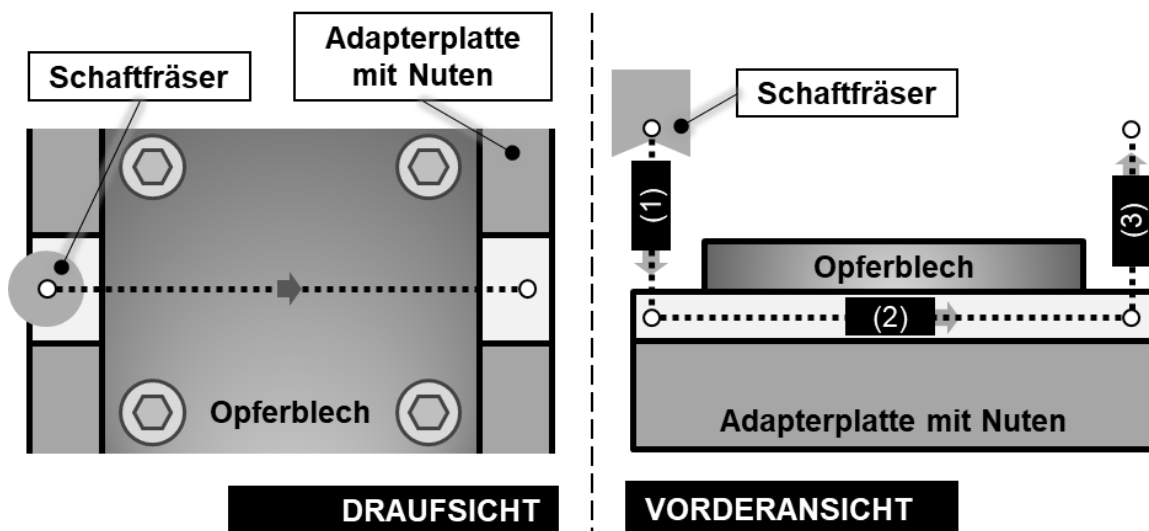


Abbildung 6–4: Drei Phasen der Versuchsdurchführung

In Tabelle 6-4 ist eine Zusammenfassung der genutzten technischen Systeme mit ihrer jeweiligen Modellbezeichnung sowie einer kurzen technischen Spezifikation aufgeführt.

Tabelle 6-4: Spezifikation der technischen Systeme für die Prozessuntersuchungen

Technisches System	Technische Spezifikation
Portalfräsmaschine (CNC-Step T-Rex Servo-0609)	Arbeitsraum xyz [mm]: 900 x 600 x 300 Max. Arbeitsgeschwindigkeit: 33 m/min, NC-Steuerung mit Software KinetiC-NC
Hochfrequenzspindel (Hiteco QD-1F 4/12 24 I30 NC CB)	Max. Drehzahl: 24.000 U/min Max. Leistung: 4,5 kW (S6) Max. Drehmoment: 3,6 Nm (S6)
Kraftmessplatte (Kistler Typ 9255C)	Kalibrierter Bereich: Fx, Fy bis 30 kN, Fz bis 60 kN Empfindlichkeit: Fx = Fy \approx -7,9 pC/N, Fz \approx -3,9 pC/N Abmessung für Aufnahme xy [mm]: 260 x 260
Kraftmessverstärker (Kistler Typ 5015A)	Messbereiche ± 2 bis 2.200.000 pC, Frequenzbereich \approx 0 ... 200 kHz
Datenlogger für Kraftmessungen (Measurement Computing DT9834-16-4-16-BNC)	16 Kanäle (seriell) / 8 Kanäle (differentiell), 16-bit-Auflösung, max. 500 kHz Samplingrate
Datenlogger für Temperaturmessung (Measurement Computing USB-TC)	8 Kanäle, 24-bit-Auflösung, max. 2 Hz Samplingrate
Temperatursensor	Thermoelemente des Typs K, Temperaturbereich: -200 bis 1300 °C mit max. Abweichungen von $\pm 2,5$ °C
Optisches Mikroskop (Zeiss Stemi 305 mit Axiocam 208 color)	Greenough-Stereomikroskop mit 5:1-Zoom, Arbeitsabstand: 110 mm, CMOS-Kamera mit 8 Megapixeln

6.1.3 Ermittlung des stabilen Parameterfensters für den Fräsprozess

Die nachfolgenden Ergebnisse sind im Rahmen der Arbeit von (A_Zöller 2023) erarbeitet und zusammengefasst dargestellt.

Zur Beurteilung der Prozessstabilität werden die Spanrückstände an Schnitträndern bewertet und in die Kategorien unterteilt (vgl. Abbildung 6–5):

- (1) keine bis vereinzelt fadenartige Rückstände,
- (2) gehäuft fadenartige Rückstände und
- (3) Wirrspäne.

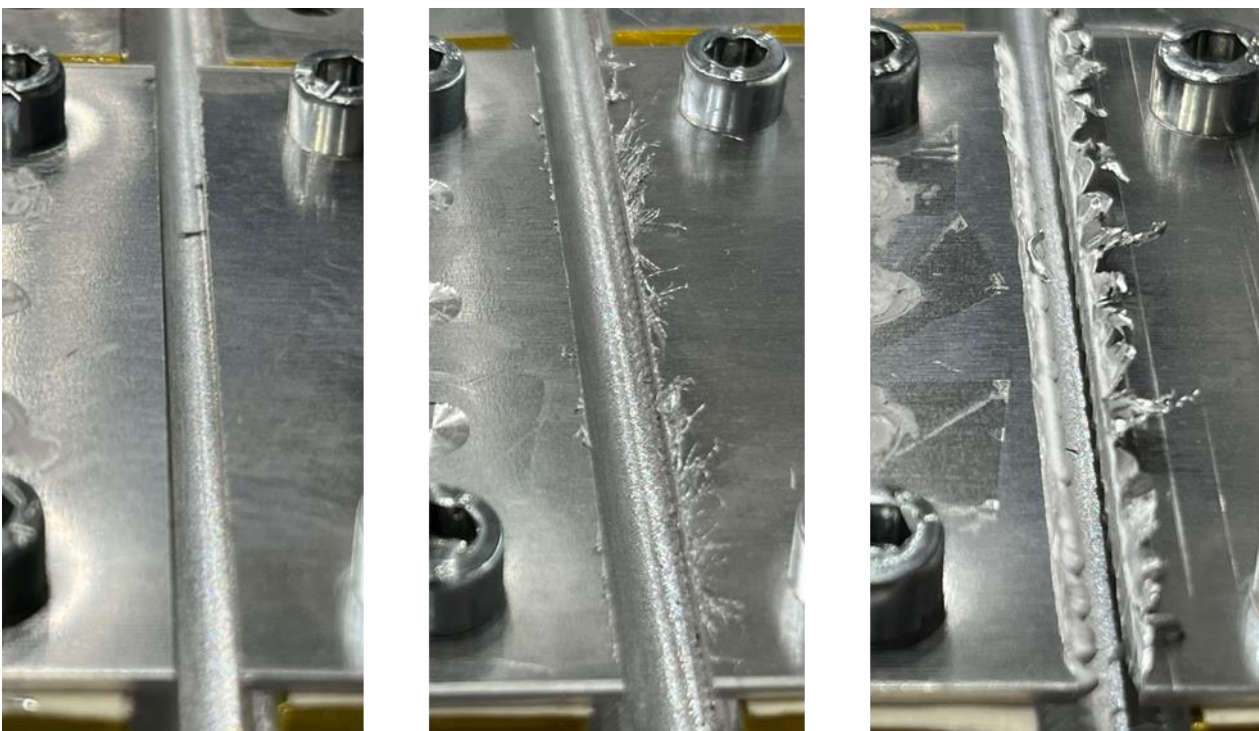


Abbildung 6–5: Kategorisierung der Trennschnitte: (links) 1, (Mitte) 2 und (rechts) 3 (A_Zöller 2023)

Insbesondere Trennschnitte mit Spanrückständen, welche Kategorie (2) und (3) zuzuordnen sind, zeigen deutlich visuelle Hinweise auf Prozessinstabilitäten. Die damit verbundenen Prozessparameter sind daher möglichst zu vermeiden. Eine weitere Ursache kann ein fortgeschrittener Verschleiß der Schneidkanten sein. Dies kann z. B. unter einem Mikroskop untersucht werden. Die Bildung von Wirrspänen und damit einhergehend das Zusetzen des Fräasers kann auch im fortgeschrittenen Verlauf des Fräsvorgangs stattfinden (siehe Abbildung 6–6). Hierbei handelt es sich um Trennschnitte der Kategorie (3), die vermieden werden sollten.

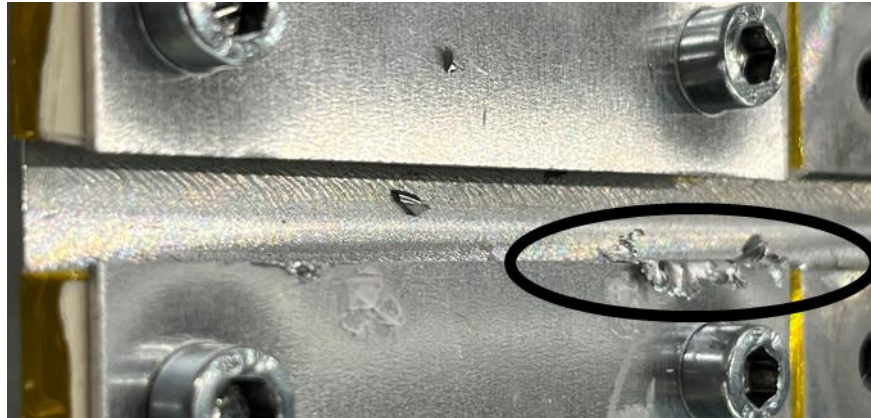


Abbildung 6–6: Trennschnitt der Kategorie 3 mit spät einsetzender Wirrspanbildung in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

Zur Ermittlung des stabilen Prozessparameterfensters für den ausgewählten Fräser aus Kapitel 6.1.1 (Garant VHM-Fräser 201170) werden Fräsversuche mit jeweils einer Wiederholung durchgeführt. Eine Wiederholung ist legitim, da es sich um eine qualitative und aufwandsminimale Abschätzung des Parameterraums handelt. Der Fokus liegt nicht auf einer statistisch abgesicherten Analyse, sondern auf der effizienten Identifikation eines stabilen Prozessparameterfensters. Die Beurteilung der Schnittqualität erfolgt auf Basis der visuellen Begutachtung des Werkstücks anhand des Spanrückstandes. Hieraus ergibt sich die Beurteilung: gut (Kategorie 1), akzeptabel (Kategorie 2) sowie schlecht (Kategorie 3). Die Einflussgrößen Werkzeugdurchmesser d_w , Schnitttiefe a_p sowie Schnittgeschwindigkeit v_c (bedingt durch die maximale Spindeldrehzahl) sind in feste Faktorstufen unterteilt (vgl. Tabelle 6-5). Der Vorschub pro Zahn f_z wird ausgehend von einem stabilen Startwert inkrementell erhöht, bis instabile Prozesserscheinungen auftreten.

Tabelle 6-5: Versuchsplanung zur Parametereingrenzung

Einflussgrößen	Faktoren	Faktoranzahl
Werkzeugdurchmesser d_w	4; 6; 8 mm	3
Schnitttiefe a_p (= Blechdicke)	1,5 mm	1
Vorschub pro Zahn f_z	Startwert: 0,01 mm	adaptiv
Schnittgeschwindigkeit v_c	{25; 50; 75}* d_w m/min	3

Aus den Versuchsreihen ergeben sich für die verschiedenen Werkzeugdurchmesser d_w jeweils Parameterfelder mit stabilen Prozessparameterfenstern, die in Abbildung 6–7, Abbildung 6–8 sowie Abbildung 6–9 ersichtlich sind. In den gezeigten Parameterfeldern sind für jeden der getesteten Werkzeugdurchmesser d_w stabile

Parameterfenster (grün schraffiert), bestehend aus der Schnittgeschwindigkeit v_c sowie dem Zahnvorschub f_z , zu erkennen. Jeder Trennschnitt (entspricht einem Messpunkt in den Parameterfeldern) wurde visuell beurteilt und in die Kategorie (1), (2) oder (3) eingeordnet.

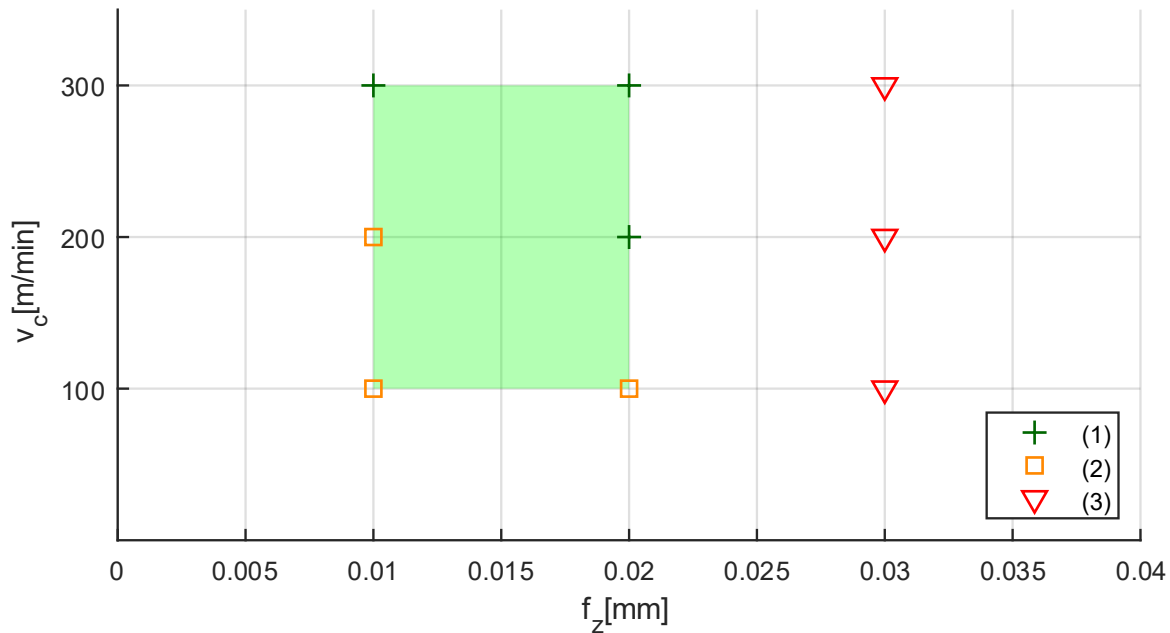


Abbildung 6–7: Parameterfeld bei Werkzeugdurchmesser 4 mm in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

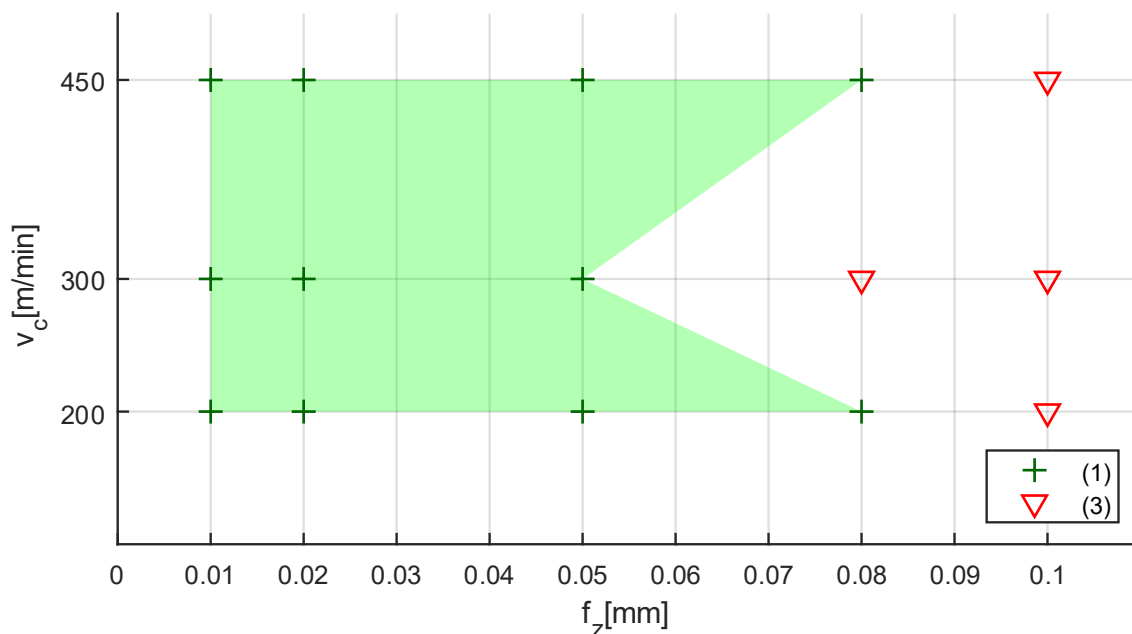


Abbildung 6–8: Parameterfeld bei Werkzeugdurchmesser 6 mm in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

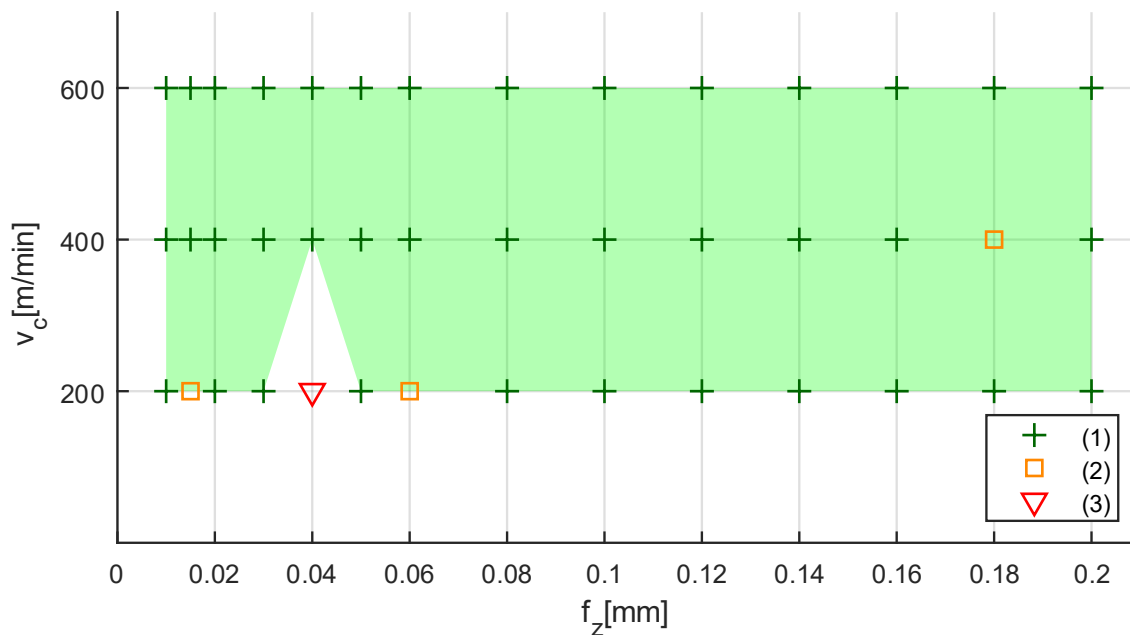


Abbildung 6–9: Parameterfeld bei Werkzeugdurchmesser 8 mm in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

Einen limitierenden Faktor bei den Werkzeugdurchmessern 4 mm und 6 mm stellen hohe Zahnvorschübe unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit dar. Größere Werkzeugdurchmesser sind mit einem breiteren Parameterfenster verbunden, was höhere Schnittgeschwindigkeiten und Zahnvorschübe erlaubt. Aus Sicht der Produktivität sind somit größere Durchmesser zu präferieren. Die Versuche zur Absicherung hinsichtlich der kritischen, produktbezogenen Größen werden daher nachfolgend mit dem größten Fräser (Werkzeugdurchmesser 8 mm) durchgeführt.

6.2 Absicherung hinsichtlich kritischer, produktbezogener Größen

Das Ziel des vorliegenden Kapitels stellt die empirische und modellbasierte Absicherung der identifizierten, kritischen Größen beim Zerspanen von Aluminiumblechen im Kontext der Batteriemoduldemontage dar. Die Abschätzung der Größen erfolgt konservativ, d. h., die tatsächlichen Größen können geringer ausfallen und die Grenzwerte höher liegen. Die Vereinfachung durch eine konservative Abschätzung ist tolerierbar, da erst das Überschreiten eines Grenzwertes zum kritischen Zwischenfall führen kann. In Bezug zum Produkt darf, wie bereits in Kapitel 4.1.5 beschrieben, der Span eine kritische Länge nicht überschreiten, was ansonsten zum Kurzschluss beim Kontakt zwischen zwei Zellpolen bei nicht-tiefentladenen Zellen führen kann. Zwei oder mehr

Späne, die überlappen, werden nicht betrachtet, da das Batteriemodul horizontal eingespannt ist und die Gefahr, dass mehrere Späne an der Oberfläche hängenbleiben und eine Brücke bilden, nahezu ausgeschlossen ist. Zur zusätzlichen Sicherstellung einer permanenten Spanabfuhr kann auf eine Druckluftkühlung gesetzt werden. Neben der Kontrolle der Spanlänge ist auch die Einhaltung einer Grenztemperatur entscheidend, da das Überschreiten dieser Temperatur über eine längere Dauer ein thermisches Durchgehen herbeiführen könnte. Die nachfolgenden Ergebnisse sind im Rahmen von (A_Zöller 2023) erarbeitet und zusammengefasst dargestellt.

Die Versuchsplanung in vollfaktorieller Ausführung, welche das stabile Prozessfenster aus Kapitel 6.1.3 für den ausgewählten Fräser mit dem Durchmesser d_w von 8 mm weitestgehend abdeckt, ist in Tabelle 6-6 aufgelistet. Die geringen Streuungen der Messergebnisse rechtfertigen drei Wiederholungen als ausreichend für repräsentative Ergebnisse.

Tabelle 6-6: Versuchsplanung zur Absicherung hinsichtlich kritischer, produktbezogener Größen

Einflussgrößen	Faktoren à 3 Wiederholungen	Faktoranzahl
Werkzeugdurchmesser d_w	8 mm	1
Schnitttiefe a_p (= Blechdicke)	1,5 mm; 2,5 mm	2
Vorschub pro Zahn f_z	0,01; 0,05; 0,20 mm	3
Schnittgeschwindigkeit v_c	200; 400; 600 m/min	3

Innerhalb des stabilen Prozessfensters soll eine empirische und modellbasierte Abschätzung und Vorhersage der folgenden Zielgrößen zum Zweck der Absicherung erfolgen:

- Maximal erlaubte Kraft F_{max} am Zellpol (siehe Schnitt- und Vorschubkraft; Passivkraft kann vernachlässigt werden)
- Grenztemperatur T_{max} im Bereich des Zellpols nahe am Trennschnitt
- Maximale, kritische Spanlänge $l_{krit,max}$, definiert als Abstand zwischen den zwei am weitesten entfernten Punkten am Span

Nachfolgend wird auf die Auswertemethodik im Hinblick auf die Zielgrößen eingegangen.

6.2.1 Methodik zur Messauswertung

Im Folgenden wird jeweils die Methodik zur Messauswertung der Kraft, der Temperatur sowie der kritischen Spanlänge dargelegt.

6.2.1.1 Kraftmessung

Die Kraftmessung erfolgt mithilfe der oben beschriebenen Kraftmessplatte in drei Raumrichtungen (X, Y, Z). Die mittels Kraftverstärker verstärkten und per Datenlogger digitalisierten drei Rohsignale werden mit einer Samplingrate von 20 kHz für die gesamte Dauer des Trennschnitts aufgezeichnet. Es erfolgt eine Glättung der Signale anhand des gleitenden Mittelwertes von 250 Messpunkten. Abbildung 6–10 veranschaulicht das Rohsignal sowie den geglätteten Signalverlauf einer Beispielkraftmessung in y-Richtung. Die Spannungsdicke h , welche abhängig vom Vorschubrichtungswinkel φ gemäß der Beziehung $h(\varphi) \approx \sin(\varphi)$ ist, schwankt während des Fräsprozesses (Dietrich & Richter 2020). Aus diesem Grund ist eine Oszillation des Kraftverlaufs im ungefilterten Signal bemerkbar. Der Beginn und das Ende des Trennschnitts sind im geglätteten Kraftverlauf durch positive bzw. negative Flanken gekennzeichnet.

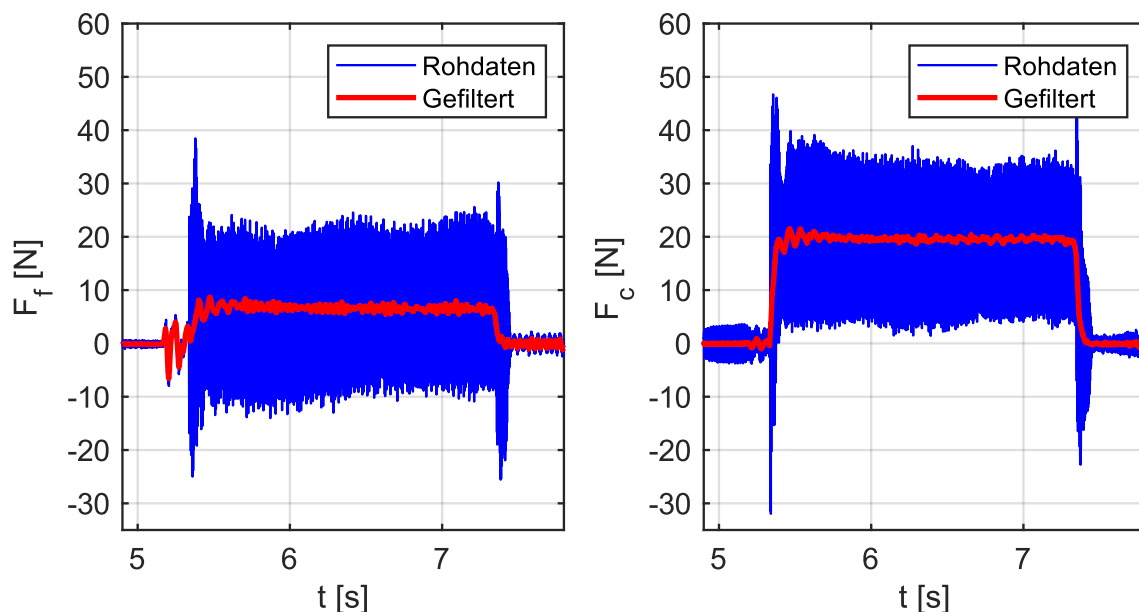


Abbildung 6–10: Ungefilterter und geglätteter Kraftverlauf in y-Richtung in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

Zur Beurteilung der Zerspan- und Vorschubkraft für einen Frässchnitt wird der durchschnittliche Kraftwert zwischen Fräsbeginn und -ende auf Basis des geglätteten Signalverlaufs herangezogen.

6.2.1.2 Temperaturmessung

Wie bereits oben beschrieben, erfolgt die Temperaturmessung für einen Trennschnitt taktil über zwei Thermoelemente an definierten Positionen (vgl. Abbildung 6–3). An diesen Positionen, die sich am Rand des Zellterminals und besonders nahe am Frässchnitt befinden, wird die kritischste Temperatur erwartet. Mittels Datenlogger werden die Signale mit 2 Hz digitalisiert und können analog zur Kraftmessung aufgezeichnet werden. Ein typischer Temperaturverlauf ist in Abbildung 6–11 anhand der Werte der Sensoren 1 und 2 zu sehen. Da die Sensoren 3 und 4 für den benachbarten Trennschnitt vorgesehen sind und zur Aufwandsminimierung beim Umrüsten des Messequipments mitgemessen werden, werden die Temperaturverläufe dieser Sensoren mitgeführt.

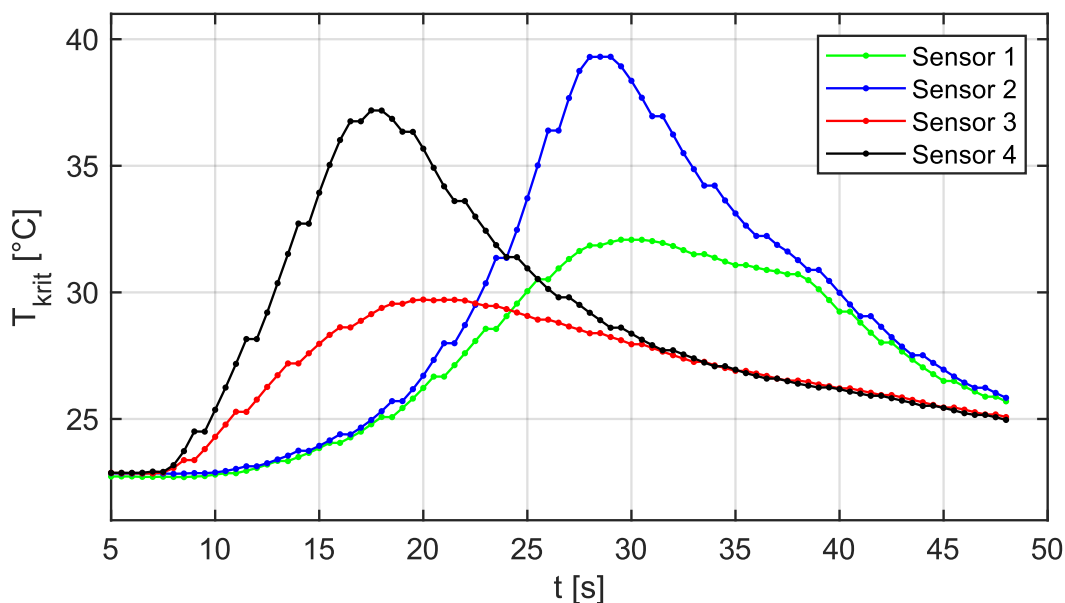


Abbildung 6–11: Signalverläufe der Temperaturen an den Sensoren 1, 2, 3 und 4 in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

Zur Beurteilung der maximalen Temperaturen in der Nähe des Trennschnitts wird der maximale Wert der ungefilterten Temperaturverläufe an den Sensoren 1 und 2 ermittelt.

6.2.1.3 Kritische Spanlänge

Sofern es sich beim vorliegenden Trennschnitt um einen Prozess im stabilen Parameterfenster handelt und beim Fräsen Bröckelspäne, kurze Wendelspäne, Wendelspanstücke oder Spiralspäne entstehen, werden die entstehenden Späne aufgesammelt und unter einem Mikroskop mit bis zu 5-facher Vergrößerung visuell begutachtet. Mithilfe eines Millimeterpapiers als Maßstab erfolgt eine optische Messung der kritischen Länge von zehn Spänen pro Frässchnitt. Für die Auswertung der kritischen Spanlänge

eines Trennschnitts werden der Mittelwert sowie das Maximum der zehn Werte ermittelt. Beispielaufnahmen der Späne unter dem Mikroskop und mit dem Millimeterpapier als Maßstab sind in Abbildung 6–12 zu betrachten.

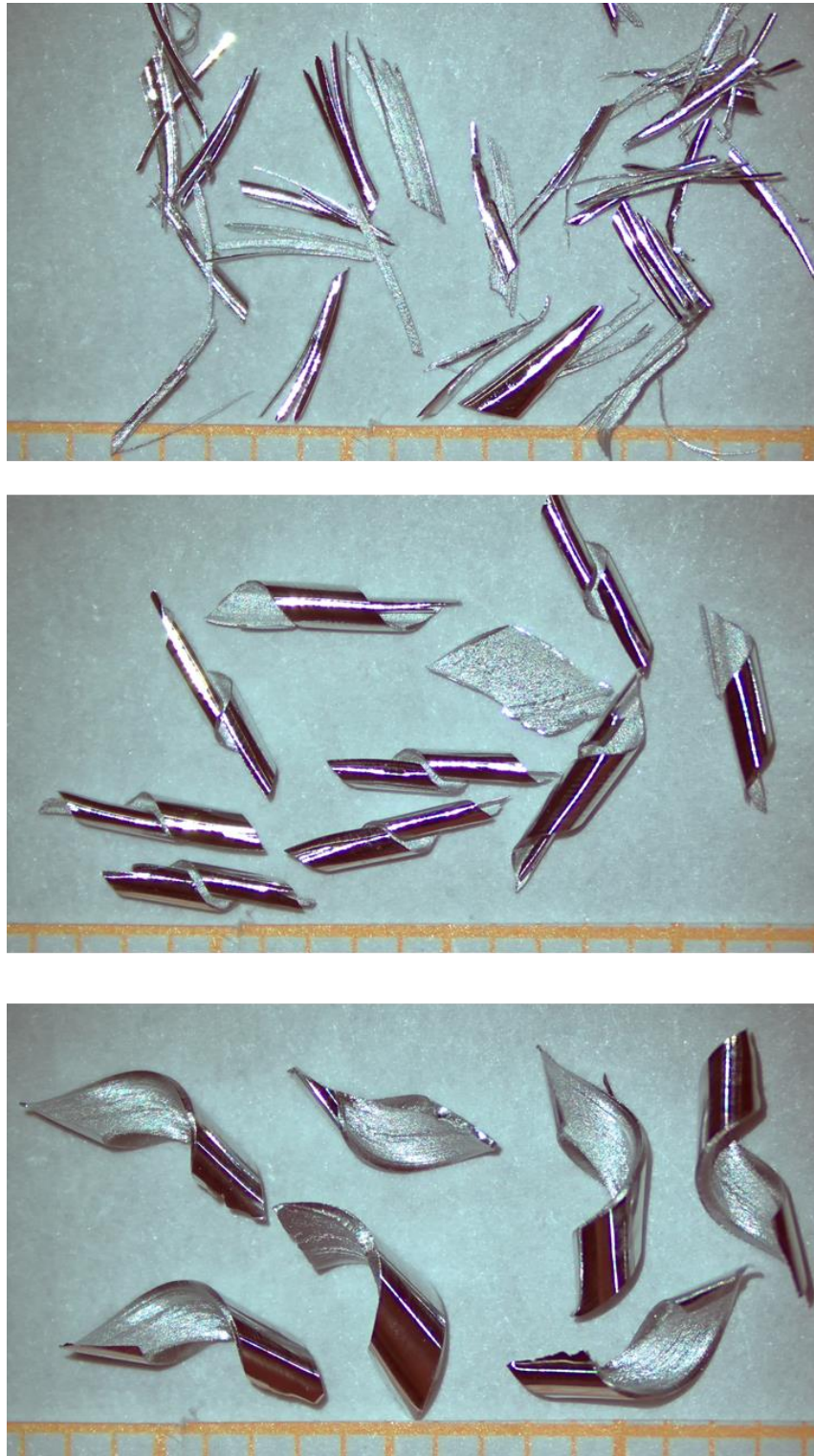


Abbildung 6–12: Späne unter Mikroskop: (oben) Bröckelspäne [d8v4f10a2,5], (Mitte) kurze Wendelspäne [d8v6f50a1,5], (unten) Wendelspanstücke [d8v6f200a1,5] in Anlehnung an (A_Zöllner 2023)

6.2.2 Abschätzung der Schnitt- und Vorschubkraft

Bei der Kraftmodellierung wird von einem freien, schrägen Schnitt nach (Klocke 2018) ausgegangen. Nach (Klocke 2018) kann die resultierende Gesamtkraft in die Kraftkomponenten Schnitt- F_c , Vorschub- F_f und Passivkraft F_p unterteilt werden. Die Passivkraft ist im Vergleich zu den anderen Kräften vernachlässigbar und wird daher im weiteren Verlauf nicht weiterverfolgt. Die Modellierung und Vorhersage für die Schnittkraft F_c erfolgt nach Kienzle (Klocke 2018) gemäß der Gleichung

$$F_c = k_{c1,1} * b * h^{1-m_c} \quad 6-1$$

mit Spanungsbreite b (gleichzusetzen mit Schnitttiefe a_p bzw. Blechdicke b_d) und Spanungsdicke h sowie Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft m_c . Die spezifische Schnittkraft $k_{c1,1}$ ist die erforderliche Schnittkraft bei $b = 1 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$. Die Berechnung der Vorschubkraft F_f erfolgt analog. Zu beachten ist, dass die Spanungsdicke $h(\varphi)$ während eines Schnitts variiert und abhängig vom Vorschubrichtungswinkel φ ist (Klocke 2018). Bei der Modellierung wird von der maximalen Spanungsdicke h_{max} ausgegangen, welche mit dem Zahnvorschub f_z gleichgesetzt werden kann (vgl. (Denkena & Tönshoff 2011)).

Für die nachfolgende Betrachtungen werden die Schnitt- F'_c sowie die Vorschubkraft F'_f , normiert auf $b = 1 \text{ mm}$, herangezogen. Durch Umstellung von Formel 6-1 lässt sich die Schnittkraft normiert auf $b = 1 \text{ mm}$ bestimmen (F'_f erfolgt analog dazu):

$$F'_c = \frac{F_c}{b} = k_{c1,1} * h^{1-m_c} \quad 6-2$$

Im Rahmen der Kraftmodellierung werden die Bereiche $h_{max} < 0,1 \text{ mm}$ sowie $h_{max} \geq 0,1 \text{ mm}$ separat betrachtet. Die Ermittlung der beiden Koeffizienten k und m erfolgt für jeweils einen der beiden Bereiche mithilfe der linearen Regression auf Basis der experimentell ermittelten Werte für die Zerspan- und Vorschubkraft aller Messungen bei den Zahnvorschüben $h_{max} = \{0,01 \text{ mm}; 0,1 \text{ mm}; 0,2 \text{ mm}\}$.

Auf die Verwendung von Korrekturfaktoren für den Spanwinkel, den Schneidstoff, die Kühlung sowie die Werkstückform wird nachfolgend verzichtet, da die Randbedingungen hinsichtlich der genannten Punkte konstant sind. In den anschließenden Untersuchungen können sich lediglich die Schnittgeschwindigkeit sowie der Verschleiß auf die

Kräfte auswirken. Die tatsächliche Schnittkraft F_c^* unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren für die Schnittgeschwindigkeit K_v und den Verschleiß K_{WV} ist nach (Böge et al. 2021) gegeben durch:

$$F_c^* = F_c * K_v * K_{WV} \quad 6-3$$

Gemäß (Böge et al. 2021) kann mit den in Tabelle 6-7 dargestellten Korrekturfaktoren und daraus resultierenden Schwankungen auf die Schnittkraft gerechnet werden. Einen signifikanten Einfluss stellt der Werkzeugverschleiß mit einer maximalen Überhöhung der Schnittkraft um 40 Prozent dar. Der Verschleiß sollte sich daher bei konstanter Schnittgeschwindigkeit sowie bei konstantem Zahnvorschub im Kraftverlauf bemerkbar machen. Die Schnittgeschwindigkeit zeigt hingegen einen negativen Einfluss auf die tatsächliche Schnittkraft: Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit sollte eine leichte Abnahme der Kraft zu beobachten sein.

Tabelle 6-7: Mögliche Einflussfaktoren auf die Kraftmodellierung

Einflussfaktor	Korrekturfaktoren	Spannbreite der Schnittkraft
Schnittgeschwindigkeit	$K_v = 0,952 - 0,882$ (200 – 600 m/min)	100 % – 108 %
Werkzeugverschleiß	$K_{WV} = 1,25 - 1,4$	100 % – 140 %

Die Ergebnisse der Messung und Auswertung der Schnitt- F_c' sowie Vorschubkraft F_f' , normiert auf $b = 1 \text{ mm}$, sowie die modellhafte Abbildung nach Kienzle sind jeweils in Abbildung 6–13 und Abbildung 6–14 für alle drei Schnittgeschwindigkeiten ersichtlich. Die ermittelten Kienzle-Koeffizienten sind in Tabelle 6-8 angegeben.

Tabelle 6-8: Angenäherte Kienzle-Parameter für die Schnittkraft und Vorschubkraft

$0,01 \text{ mm} < f_z < 0,1 \text{ mm}$	$k_{c1.0,1} = 118,768 \text{ N/mm}^2$	$k_{f1.0,1} = 23,890 \text{ N/mm}^2$
	$m_{c1.0,1} = 0,262$	$m_{f1.0,1} = 0,449$
$0,1 \text{ mm} < f_z < 0,2 \text{ mm}$	$k_{c1.0,2} = 160,448 \text{ N/mm}^2$	$k_{f1.0,2} = 28,448 \text{ N/mm}^2$
	$m_{c1.0,2} = 0,131$	$m_{f1.0,2} = 0,373$

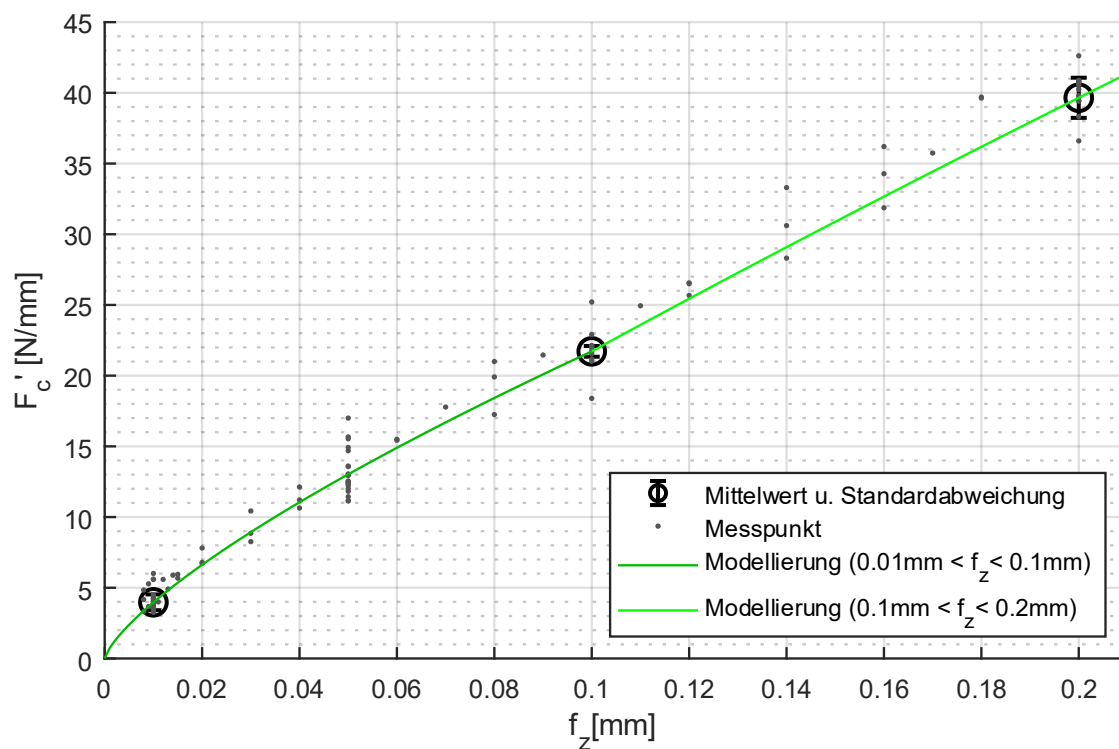


Abbildung 6–13: Spezifische Schnittkraft in Abhängigkeit des Zahnvorschubs für alle drei Schnittgeschwindigkeiten in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

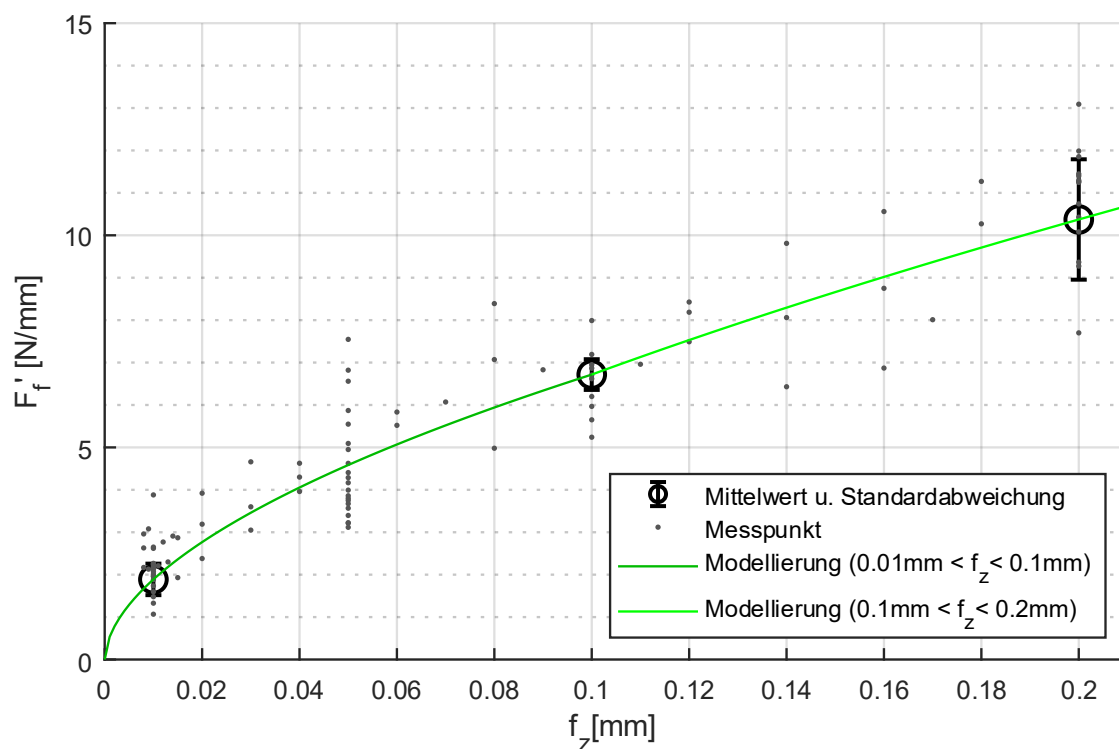


Abbildung 6–14: Spezifische Vorschubkraft in Abhängigkeit des Zahnvorschubs für alle drei Schnittgeschwindigkeiten in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

In den beiden Diagrammen ist eine gewisse Streuung der gemessenen Werte zu sehen. Die relative Streuung bei der Vorschubkraft ist stärker ausgeprägt, da die Vorschubkraft im Vergleich zur Zerspankraft bei gleichbleibender, absoluter Messunsicherheit kleiner ausfällt. Weitere Gründe für die Streuungen könnten die verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten sowie anfänglicher Verschleiß sein (siehe Korrekturfaktoren). Dennoch kann mit dem Modell und den ermittelten Kienzle-Parametern eine Einschätzung der maximal auftretenden Kräfte beim Fräsen der Busbars im stabilen Prozessfenster vorgenommen werden. Bei einem maximalen Wert von $F'_{c,max} = 40 \frac{N}{mm}$ sowie $F'_{f,max} = 11 \frac{N}{mm}$ (im Kienzle-Verlauf) werden bei einer maximalen Busbar-Dicke von $b_{d,max} = 2,5 \text{ mm}$ maximale Schnitt- und Vorschubkräfte von $F_{c,max} = 100 \text{ N}$ sowie $F_{f,max} = 27,5 \text{ N}$ erwartet. Im Zusammenhang mit dem angenommenen Grenzwert für die Kraft $F_{max} = 300 \text{ N}$ (vgl. Kapitel 4.1.5) sind das unkritische Werte. Zugleich bilden die maximal auftretenden Kräfte die Grundlage für die Abschätzung der prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebung am eingesetzten 6-Achs-Knickarmroboter.

6.2.3 Abschätzung der kritischen Temperaturen

Zur Abschätzung der maximal vorliegenden Temperaturen an den Zellpolen im stabilen Prozessfensterbereich finden zunächst Messungen gemäß dem im Kapitel 6.2 vorgestellten Versuchsplan statt. Wie bereits in Kapitel 6.2.1.2 erwähnt, erfolgt die Messung möglichst nahe am Trennschnitt im Bereich der Zellpole, da hier die maximale Temperatur an den Zellen erwartet wird, welche kritisch sein kann.

Die in Abbildung 6–15 dargestellten Messergebnisse zeigen die maximalen Temperaturen an der kritischen Position in Abhängigkeit vom Zahnvorschub für verschiedene Schnittgeschwindigkeiten. Dabei ist eine tendenzielle Verringerung der maximalen Temperaturen mit zunehmendem Zahnvorschub und höherer Schnittgeschwindigkeit erkennbar. Die Abhängigkeit der maximalen Temperatur vom Zahnvorschub folgt einer antiproportionalen Beziehung und kann durch eine Hyperbel angenähert werden.

Dies lässt sich damit erklären, dass bei höherem Zahnvorschub pro Zahn ein größerer Span abgetragen wird, wodurch mehr Wärme direkt über den Span abgeführt wird. Gleichzeitig verkürzt sich die Kontaktzeit der Schneide mit dem Werkstück, sodass weniger Wärme in das Material eindringt. Obwohl die Gesamtarbeit näherungsweise konstant bleibt, führt die veränderte Wärmeverteilung zu einer niedrigeren gemessenen Temperatur.

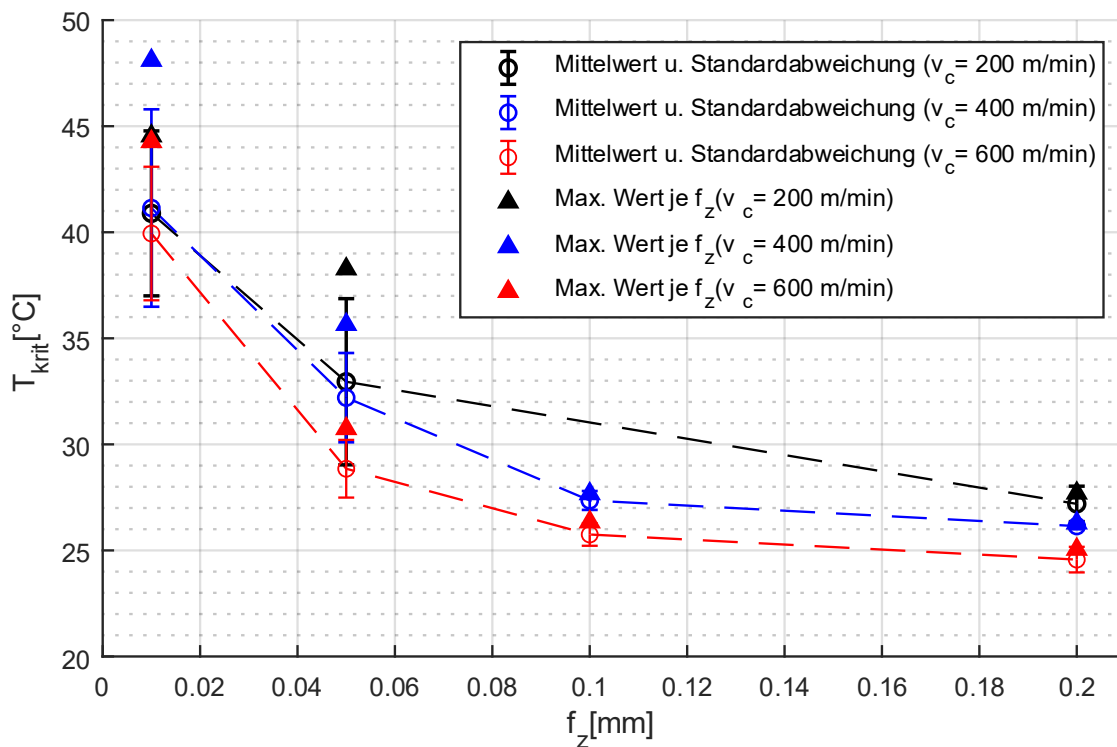


Abbildung 6–15: Gemessene Maximaltemperaturen an der kritischen Position in Abhängigkeit des Zahnvorschubs sowie Schnittgeschwindigkeiten in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

Neben der geringeren Temperatur an der kritischen Position bietet ein höherer Zahnvorschub auch den Vorteil einer gesteigerten Produktivität, da er mit einer höheren Vorschubgeschwindigkeit (bei konstanter Spindeldrehzahl) einhergeht. Daher wird zur Minimierung der maximalen Temperaturen sowie zur Maximierung der Produktivität ein möglichst hoher Zahnvorschub und eine hohe Schnittgeschwindigkeit empfohlen.

Alles in allem konnten im stabilen Parameterfenster (siehe Kapitel 6.1.3) an der kritischsten Position maximale Temperaturen bis 48 °C im Rahmen der Messgenauigkeit gemessen werden. Treten hingegen Prozessinstabilitäten auf, die sich beispielsweise durch die Bildung von Wirrspänen sowie das Zusetzen des Fräasers äußern (vgl. Abbildung 6–16), wurden maximale Temperaturen bis 134 °C aufgezeichnet. Sofern ein stabiler Prozess vorliegt, liegen die maximal auftretenden Temperaturen an der kritischsten Position unter der angenommenen Grenztemperatur $T_{max} = 65$ °C. Ein prozesssicheres Fräsen mit dem identifizierten Werkzeug und den stabilen Parametern ist somit im Hinblick auf die thermische Gefahr unkritisch.



Abbildung 6–16: Trennschnitt bei instabilen Prozessparametern mit überhöhten Temperaturen (A_Zöller 2023)

6.2.4 Abschätzung der kritischen Spanlänge

Zur Abschätzung der kritischen Spanlänge werden, wie bereits in Kapitel 6.2.1.3 beschrieben, die entstandenen Späne aufgesammelt und anhand der Messung der kritischen Länge der Späne pro Frässchnitt das Maximum sowie der Mittelwert ermittelt.

Im untersuchten, stabilen Prozessfenster sind insbesondere zwei verschiedene Spanformen aufgetreten. Bei geringen Zahnvorschüben wurden feine Bröckelspäne beobachtet, während bei mittleren bzw. maximalen Vorschüben kurze Wendelspäne bzw. Wendelspanstücke aufgetreten sind (siehe Abbildung 6–12). Die maximale, kritische Spanlänge im betrachteten Untersuchungsbereich ist $l_{krit,max} = 6,4 \text{ mm}$.

Aus der Analyse der Abhängigkeit vom Zahnvorschub kann eine tendenzielle Zunahme der maximalen, kritischen Spanlänge mit Zunahme des Vorschubs im betrachteten Bereich festgestellt werden, wie in Abbildung 6–17 dargestellt ist. Die Abbildung zeigt den Verlauf der maximalen, kritischen Spanlänge in Abhängigkeit des Zahnvorschubs sowie die jeweiligen Auswertepunkte pro Frässchnitt. Es sind stärkere Streuungen der kritischen Spanlängen im unteren Zahnvorschubbereich zu verzeichnen. Die maximale, kritische Spanlänge wurde nicht erwartungsgemäß beim maximalen, getesteten Zahnvorschub $f_{z,max} = 0,2 \frac{\text{mm}}{\text{Zahn}}$ gemessen, sondern beim Zahnvorschub $f_z = 0,05 \frac{\text{mm}}{\text{Zahn}}$ identifiziert.

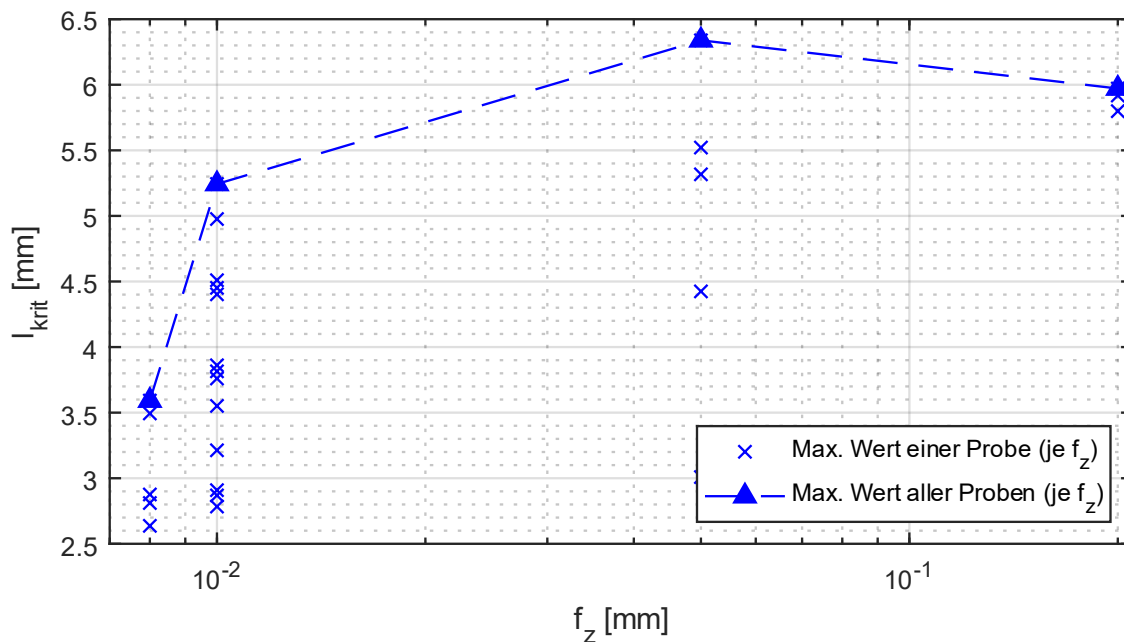


Abbildung 6–17: Maximale, kritische Spanlängen in Abhängigkeit des Zahnvorschubs in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

Bei der Analyse der Abhängigkeit vom Werkzeugdurchmesser konnte ein progressiver Zusammenhang identifiziert werden, wie in Abbildung 6–18 ersichtlich ist. Die Abbildung zeigt, ähnlich wie Abbildung 6–17, die maximale, kritische Spanlänge in Abhängigkeit des Werkzeugdurchmessers. Die maximale, kritische Spanlänge wurde bei maximal eingesetztem Werkzeugdurchmesser $d_{w,max}$ festgestellt.

Dass die maximale, kritische Spanlänge nicht beim höchsten Zahnvorschub, sondern bereits bei einem niedrigeren auftrat, könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich bei unterschiedlichen Zahnvorschüben verschiedene Spanformen bevorzugt ausbilden (siehe Kapitel 2.2.1). Da die kritische Spanlänge als der Abstand zwischen den entferntesten Punkten eines gefalteten Spans definiert ist, variiert sie je nach Spanform, selbst wenn die Geometrie im ausgefalteten Zustand identisch ist. Im Gegensatz dazu konnte bei der Analyse der Abhängigkeit vom Werkzeugdurchmesser erwartungsgemäß eine progressive Beziehung festgestellt werden. Dies liegt daran, dass bei größerem Werkzeugdurchmesser sämtliche innerhalb der Untersuchung möglichen Spanformen entstehen können, was eine stetige Zunahme der maximalen, kritischen Spanlänge begünstigt.

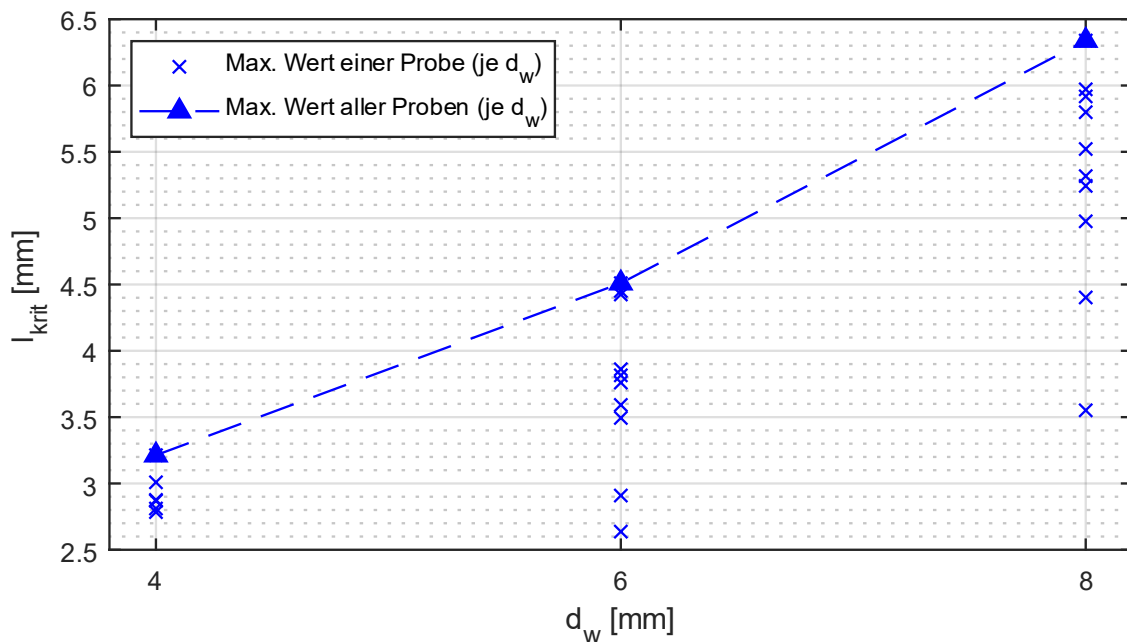


Abbildung 6–18: Mittlere und maximale, kritische Spannlängen in Abhängigkeit des Werkzeugdurchmessers in Anlehnung an (A_Zöller 2023)

In Zusammenhang mit der vorliegenden Problemstellung, Trennen der Busbars an Batteriemodulen mittels ausgewähltem Fräswerkzeug, können aus den Erkenntnissen die nachfolgenden Schlussfolgerungen gezogen werden. Diese gelten für ebene, nicht umgeformte Aluminiumbleche. Zum einen ist bei größeren Werkzeugdurchmessern mit höheren Werten für die kritische Spannlänge zu rechnen. Zum anderen zeigt sich eine positive Tendenz der kritischen Spannlänge mit Zunahme des Zahnvorschubs. Die maximale, kritische Spannlänge $l_{krit,max}$ tritt jedoch nicht beim maximalen Zahnvorschub auf. Bei einer maximalen, kritische Spannlänge von $l_{krit,max} = 6,4$ mm können Batteriemodule mit nicht-tiefentladenen Batteriezellen mit einem größeren Zellpolabstand von $a_{krit} > 6,4$ mm (vgl. Kapitel 4.1.5) sicher getrennt werden, was bei der Referenzzelle CATL NMC 48Ah 3,7V der Fall ist.

6.3 Kinematische Einschränkungen und Randbedingungen

Da, wie bereits in Kapitel 2.3.1 und 4.2.2 dargelegt ist, die flexible Demontage von Lithium-Ionen-Batteriemodulen mindestens einen 6-Achs-Knickarmroboter erfordert und beim Trennprozess auf das Fräsen gesetzt wird, ergeben sich kinematische Einschränkungen und Randbedingungen für den Fräsprozess. Dies wird im Folgenden gesondert für das Trennen der Busbars untersucht. Nachfolgend werden die Erreichbarkeit der Zielpositionen, die maximal erreichbaren Werkzeugbahngeschwindigkeiten als auch der Einfluss der Roboter Genauigkeit beim vorliegenden Demontagesystem näher betrachtet.

6.3.1 Randbedingungen

Für die Untersuchung der kinematischen Einschränkungen und Randbedingungen für den Fräsprozess werden nachfolgend angenommene Randbedingungen wiedergegeben.

Feste Randbedingungen durch das Demontagesystem sind:

- Roboterkinematik, definiert durch DH-Parameter
- Konstruktion des Spannsystems inklusive geometrische Randbedingungen
- Hochfrequenz-Spindel, Konstruktion des Spindel-Flansches sowie Fräswerkzeuge einschließlich geometrische Randbedingungen

Feste Randbedingungen, gegeben durch das Produkt (vgl. Kapitel 4.1), sind:

- Werkzeug- bzw. Spindelachse steht immer senkrecht zur Zellkontaktierungsebene, auf der die Busbars liegen (entspricht der x-Achse im KOS_{OBJ})
- Vorschubbewegung erfolgt parallel zur Zellkontaktierungsebene und orthogonal zur Stapelrichtung der Zellen (entspricht der y-Achse im KOS_{OBJ})

Nähere Angaben zu Anlagen- und Roboterparametern, wie angenommene Roboterachs-Torsionssteifigkeiten, -Grenzwinkelgeschwindigkeiten und Transformationsmatrizen zwischen Teilsystemen, sind in Anhang 11.1 aufgeführt.

Das Produkt wird durch einen drehbaren Batteriemodul-Quader mit den geometrischen Randbedingungen aus Tabelle 6-9 abgebildet. Der Quader ist in Abbildung 6–19 (dunkelblau) illustriert und wird in den nachfolgenden Kapiteln als *Untersuchungsvolumen* bezeichnet. Dieses Untersuchungsvolumen definiert die möglichen Positionen der Busbars an den Batteriemodulen verschiedener Produktvarianten. Die Zellkontaktierungs-

ebene, auf der die Busbars liegen, ist dabei senkrecht zur x-Achse im KOS_{OBJ} ausgerichtet. Hinsichtlich Moduldicke und -tiefe wird von den maximalen Zellabmaßen der Norm (GB/T 34013) bei einer maximalen Zellanzahl von 12 ausgegangen. In Bezug zur Modulhöhe wird der vollständige Wertebereich aus (GB/T 34013) herangezogen. Für nähere Informationen zum generischen Aufbau von Batteriemodulen mit prismatischen Zellen sowie zu geometrischen Grenzwerten wird auf Kapitel 4.1 verwiesen. Die variablen, geometrischen Prozessparameter sowie die Grenzwerte sind in Tabelle 6-10 aufgeführt. Eine Wertekombination aus θ_{TCP} und θ_7 wird nachfolgend als *Betriebspunkt* bezeichnet.

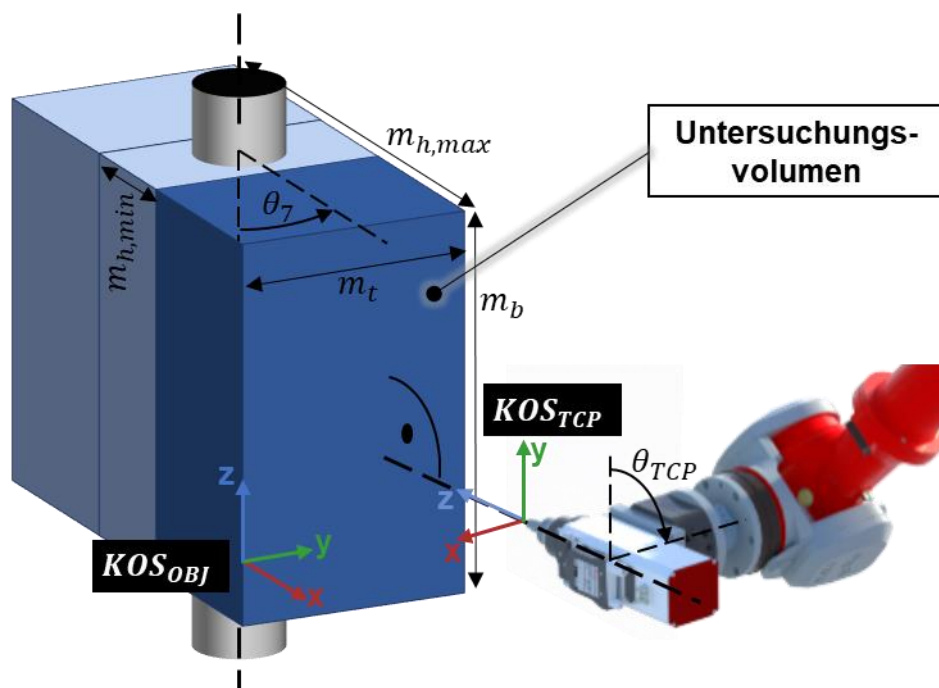


Abbildung 6–19: Definition des drehbaren Batteriemodul-Quaders

Tabelle 6-9: Geometrische Grenzwerte für den definierten Batteriemodul-Quader

Geometrische Kennwerte	Wert(e)
Moduldicke m_b [mm]	1032
Modultiefe m_t [mm]	217
Modulhöhe $m_{h,min} - m_{h,max}$ [mm]	80 – 396

Tabelle 6-10: Variable, geometrische Prozessparameter

Parameter	Untere und obere Grenze
Spindelorientierung θ_{TCP} [°]	[–90; 90]
Drehtischwinkelstellung θ_7 [°]	[–90; 90]

Für die Ermittlung der maximalen Werkzeugbahnverschiebung in x/y/z-Richtung, bedingt durch die Prozesskraft, wird von folgenden Randbedingungen ausgegangen:

- VHM-Fräser GARANT 201270 mit Werkzeugdurchmesser $d_w = 8 \text{ mm}$
- Vorschub pro Zahn $f_z = 0,2 \text{ mm}$
- Schnittgeschwindigkeit $v_c = 600 \frac{\text{m}}{\text{min}}$
- Zerspanung von reinem Aluminiumblech (AW1050) der Dicke $b_d = a_p = 2,5 \text{ mm}$

Diese Werte wurden experimentell hinsichtlich der Prozessstabilität abgesichert und weisen den höchsten Betrag der Vorschub- sowie Schnittkraftkomponenten auf. Die Passivkraftkomponente wird aufgrund des vernachlässigbaren Betrags im Folgenden nicht berücksichtigt.

Die maximalen Beträge für die Kraftkomponenten, basierend auf den experimentellen Untersuchungen für die genannten Randbedingungen (gerundet), sind:

- Schnittkraft $F_{c,max} = 100 \text{ N}$
- Vorschubkraft $F_{f,max} = 27,5 \text{ N}$

In Bezug zur Modellierung des eingesetzten 6-Achs-Knickarmroboters wird beim topologischen Modell auf eine serielle Kette mit rotatorischen Gelenken gesetzt. Das physikalische Modell bildet ein Starrkörper mit nachgiebigen Gelenken. Die Nachgiebigkeit wird durch lineare Drehfeder angelehnt an (Rösch 2014) abgebildet. Das mathematische Modell ist durch die direkte und inverse Kinematik gekennzeichnet. Die Vorwärtstransformation (direkte Kinematik) zur Bestimmung der TCP-Position sowie -Orientierung p erfolgt analytisch durch Einsetzen der Gelenkwinkelstellung q in die homogenen Matrizen. Die Rücktransformation (inverse Kinematik) erfolgt nachfolgend numerisch mithilfe der Pseudoinversen der Jacobi-Matrix nach (Whitney 1969). Für weiterführende Informationen wird auf (Buss 2004) verwiesen.

Von folgenden Vereinfachungen wird beim Robotermodell ausgegangen:

- Ideale Denavit-Hartenberg (DH)-Parameter
- Vernachlässigung der Dämpfung
- Vernachlässigung der Trägheitskräfte
- Vernachlässigung des Federstabilisierungselements zwischen Achse 2 und 3
- Vernachlässigung der Kabelführungen, insbesondere zwischen Achse 3 und 6

- Keine Kollisionsbetrachtung, insbesondere zwischen Roboterhandgelenk und Spannsystemgestell

Im Folgenden ist zu beachten, dass die Analyse für die geometrischen Randbedingungen anhand der vorliegenden Demontageanlage erfolgt.

6.3.2 Erreichbarkeitsanalyse

Nach (Siciliano 2009) bildet der Arbeitsraum den Bereich im Raum mit Zugang für den Endeffektor. Die Form und Größe des Arbeitsraums sind durch den Manipulator und die mechanischen Grenzen der Roboterachsen gegeben.

In diesem Kapitel wird für den vorliegenden Anwendungsfall überprüft, ob die Werkzeugspitze alle Punkte im Untersuchungsvolumen erreichen kann – jenes Volumen, das die Positionen der Busbars eingrenzt. Wie bereits in Kapitel 6.3.1 erläutert, steht die Werkzeugachse stets senkrecht zur Zellkontaktierungsebene. Die Spindelorientierung θ_{TCP} und Drehtischwinkelstellung θ_7 bilden dabei offene Parameter, die während der Bearbeitung fix bleiben. Die Erreichbarkeitsanalyse gilt als erfolgreich, wenn mindestens eine Wertekombination aus θ_{TCP} und θ_7 existiert, bei der alle Punkte im Untersuchungsvolumen erreichbar sind. In diesem Fall ist die Zugänglichkeit für das Trennen der Zellkontaktierungen gewährleistet.

Für die Erreichbarkeitsanalyse wird das Untersuchungsvolumen diskretisiert. Dazu wird es durch ein gleichmäßiges Gitter repräsentiert, in dem jede Dimension eine definierte Anzahl äquidistanter Gitterpunkte enthält. Die für die nachfolgende Analyse verwendeten diskretisierten Werte sind in Tabelle 6-11 zusammengefasst. Bei der Wahl der Anzahl an Gitterpunkten ist ein Kompromiss zwischen der Simulationszeit und der engmaschigen Abbildung des Untersuchungsvolumens zu treffen.

Tabelle 6-11: Diskretisierte Werte für die Erreichbarkeitsanalyse

	Wertebereich	Anzahl Gitterpunkte
Moduldicke m_b [mm]	[0; 1032]	20
Modultiefe m_t [mm]	[−108,5; 108,5]	5
Modulhöhe m_h [mm]	[40; 198]	4
Spindelorientierung θ_{TCP} [°]	[−90; 90]	7
Drehtischwinkelstellung θ_7 [°]	[−90; 90]	7

Die Erreichbarkeitsanalyse wird zweistufig ausgeführt:

1. Für jede Kombination der diskretisierten Werte aus Tabelle 6-11 wird eine numerische Lösung θ_{targ} mithilfe der Rücktransformation gesucht.
2. Falls eine numerische Lösung existiert, wird überprüft, ob θ_{targ} innerhalb der Achsgrenzen des gegebenen 6-Achs-Knickarmroboters liegt (siehe Datenblatt im Anhang 11.2).

Für die Rücktransformation ist die Vorgabe einer Zielposition p_{targ} , einer Zielorientierungsmatrix A_{targ} sowie einer initialen Achsstellung θ_{init} erforderlich. Sofern eine Lösung existiert, wird für p_{targ} und A_{targ} die Achsstellung θ_{targ} des Roboters ausgegeben, welche zu θ_{init} am nächsten ist. Zu beachten ist, dass nur eine Lösung beim eingesetzten numerischen Verfahren ausgegeben wird. Dies ist für den aktuellen Anwendungsfall jedoch ausreichend, da nur die prinzipielle Lösbarkeit überprüft werden sollte.

Abbildung 6–20 zeigt das Ergebnis der Erreichbarkeitsanalyse: die prozentuale Erreichbarkeit der Punkte p_{access} im Untersuchungsvolumen in Abhängigkeit von θ_{TCP} und θ_7 .

		$p_{access} [\%]$						
$\theta_7 [^\circ]$	90	100	100	100	100	100	83.5	18.25
	60	100	100	100	100	100	100	100
	30	15	82	99.75	100	100	100	100
	0	0	5.75	65	99	100	100	95
	-30	0	0	2.75	71.5	100	100	100
	-60	0	0	0	13	82.25	100	100
	-90	0	0	0	0	8.25	38.5	58
		-90	-60	-30	0	30	60	90
		$\theta_{TCP} [^\circ]$						

Abbildung 6–20: Prozentualer Anteil der erreichbaren Punkte p_{access} im betrachteten Untersuchungsvolumen für verschiedene θ_{TCP} und θ_7

Die Abbildung zeigt deutlich, dass bei ungefähr 47 Prozent aller Kombinationen aus θ_{TCP} und θ_7 die vollständige Erreichbarkeit (100 %) aller diskretisierten Punkte im betrachteten Volumen gegeben ist. Hervorzuheben sind dabei $\theta_{TCP} \in [-90^\circ, 30^\circ]$ und $\theta_7 \in [60^\circ, 90^\circ]$, welche die Erreichbarkeit aller Punkte im betrachteten Volumen garantieren. Des Weiteren sind in Abbildung 6–21 für drei unterschiedliche Betriebspunkte exemplarisch die erreichbaren Punkte (schwarz gekennzeichnet) im Untersuchungsvolumen dargestellt.

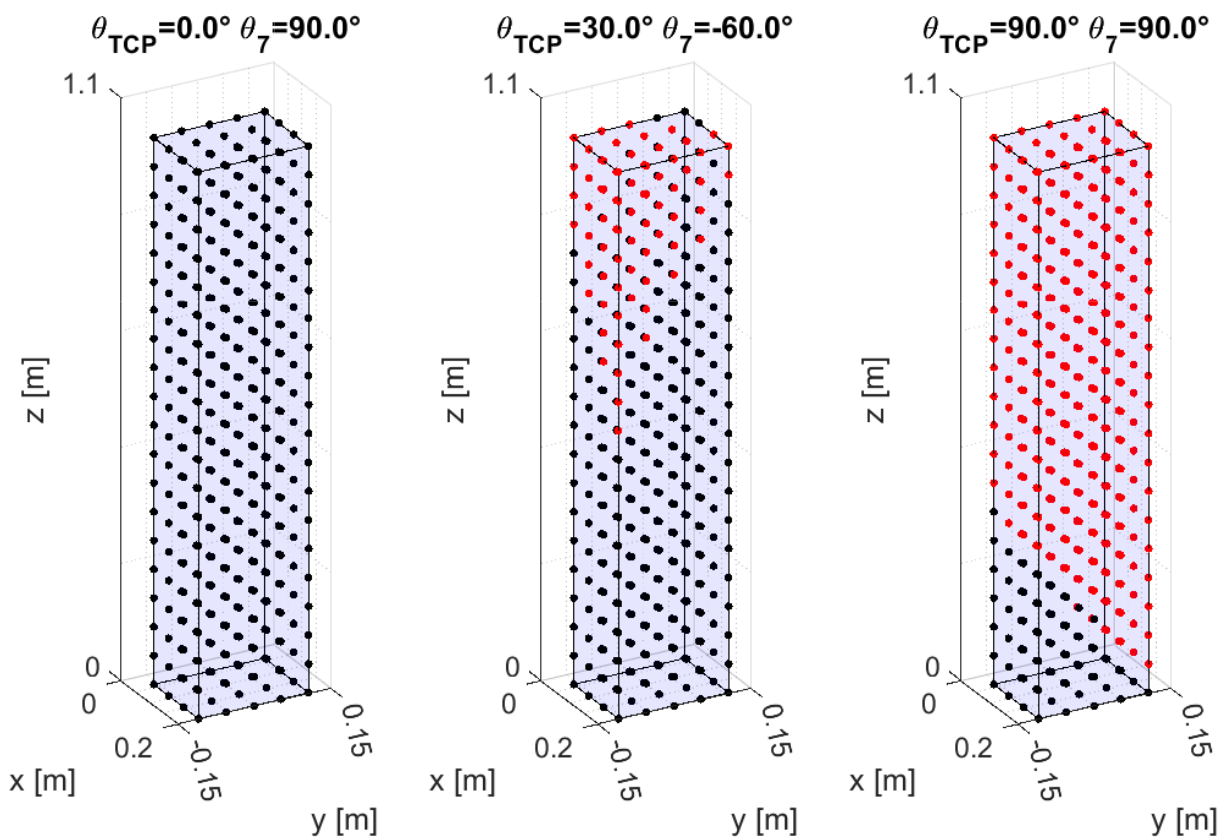


Abbildung 6–21: Exemplarische Darstellung der erreichbaren Punkte für drei unterschiedliche Betriebspunkte

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Kombinationen aus θ_{TCP} und θ_7 existieren, in denen alle Punkte im Untersuchungsraum erreichbar sind. Somit ist die Zugänglichkeit für das Trennen der Zellkontaktierungen gegeben.

6.3.3 Analyse erreichbarer Werkzeugbahngeschwindigkeiten

Wie bereits in Kapitel 6.1.1 beschrieben, wird beim Zerspanen eine konstante Vorschubgeschwindigkeit nahegelegt. In den Untersuchungen aus Kapitel 6.1.3 wurde für den ausgewählten Fräser ein stabiler Fräsprozess bei einer maximalen Schnittgeschwindigkeit $v_{c,max} = 600 \frac{m}{min}$ sowie einem maximalen Zahnvorschub $f_{z,max} = 0,2 \text{ mm}$

identifiziert, was bei einem Werkzeugdurchmesser d_w von 8 mm und einer Zähnezahl z von 2 einer maximalen Vorschubgeschwindigkeit von $v_{f,max} = f_z * z * \frac{v_{c,max}}{\pi d_w} \cong 9600 \frac{mm}{min} = 0,16 \frac{m}{s}$ entspricht. Gemäß der ausgewählten Trennstrategie (vgl. Kapitel 4.2.3) resultiert eine Fräsrichtung in y-Richtung im Objekt-Koordinatensystem (KOS) KOS_{OBJ} . Das Werkzeug ist dabei immer senkrecht zur Zellkontaktierungsebene orientiert.

Der Einfluss der Spindelorientierung θ_{TCP} und der Drehtischwinkelstellung θ_7 auf die maximal erreichbare Werkzeug-Bahngeschwindigkeit wird nachfolgend untersucht.

Gemäß (Siciliano 2009) ist die TCP-Geschwindigkeit \dot{p} unter der Kenntnis der Achswinkelgeschwindigkeit \dot{q} gegeben durch

$$\dot{p} = J(q) * \dot{q} \quad 6-4$$

mit $J(q)$ = Jacobi-Matrix der homogenen Transformationsmatrix M_{ROB}^{EE} .

In der Formel 6-4 ist klar die Abhängigkeit der TCP-Geschwindigkeit \dot{p} von der Gelenkwinkelstellung q ersichtlich. In der Nähe von Singularitäten ist die Determinante von J besonders klein, das heißt, kleine TCP-Geschwindigkeiten gehen mit hohen Achsgeschwindigkeiten einher. Bei gegebenen maximalen Winkelgeschwindigkeiten der einzelnen Roboterachsen sind die maximalen TCP-Geschwindigkeiten somit von der Roboterpose abhängig und müssen daher für jede Pose gesondert bestimmt werden. Im nachfolgenden Kapitel soll geprüft werden, ob Kombinationen aus θ_{TCP} und θ_7 existieren, bei denen für $v_{f,max} = 0,16 \frac{m}{s}$ in y-Richtung (KOS_{OBJ}) im gesamten Untersuchungsvolumen die Achsgeschwindigkeiten innerhalb der gegebenen Grenzen liegen.

Hierzu werden für verschiedene Betriebspunkte (Kombination aus θ_{TCP} und θ_7) jeweils $v_{f,konst,max}$ ermittelt. $v_{f,konst,max}$ wird als der maximale Wert für die TCP-Bahngeschwindigkeit in y-Richtung (KOS_{OBJ}) definiert, welcher im gesamten Untersuchungsvolumen durchgehend erreicht werden kann. Nachfolgend wird die Existenz von mind. einem Betriebspunkt (Kombinationen aus θ_{TCP} und θ_7) nachgewiesen, bei der $v_{f,konst,max} > v_{f,max} = 0,16 \frac{m}{s}$ gilt.

Zur Bestimmung von $v_{f,konst,max}$ wird der folgende Ansatz verwendet:

- (1) Für zwei benachbarte Punkte x_1 und x_2 auf der Fräsbahn in y-Richtung (KOS_{OBJ}) lässt sich mit der inkrementellen Bahngeschwindigkeit v_{inkr} die Zeit t_{inkr} gemäß folgender Formel ermitteln:

$$t_{inkr} = \frac{|\overline{x^{(2)}} - \overline{x^{(1)}}|}{v_{inkr}} \quad 6-5$$

- (2) Sofern die Punkte x_1 und x_2 erreichbar sind, lassen sich mittels Rücktransformation die korrespondierenden Achsstellungen $\theta_n^{(1)}$ und $\theta_n^{(2)}$ ermitteln. Aus der erforderlichen Zeit t_{inkr} sind die einzelnen Achswinkelgeschwindigkeiten ω_n gegeben durch

$$\omega_n = \frac{|\theta_n^{(2)} - \theta_n^{(1)}|}{t_{inkr}} \quad 6-6$$

mit n für den Index der Achse 1...6.

- (3) Mit der Vorgabe der maximalen Winkelgeschwindigkeit für jede Roboterachse $\omega_{n,max}$ lassen sich unter Kopplung von Formel 6-5 und 6-6 die jeweils erreichbaren Bahngeschwindigkeiten $v_{n,max}$ für die Achse $n = 1 \dots 6$ berechnen:

$$v_{n,max} = \frac{|\overline{x^{(2)}} - \overline{x^{(1)}}|}{|\theta_n^{(2)} - \theta_n^{(1)}|} * \omega_{n,max} \quad 6-7$$

- (4) Die maximal erreichbare Bahngeschwindigkeit $v_{n,max}$ zwischen x_1 und x_2 ist gegeben durch die limitierende Achse N :

$$v_{max} = \min_{n=1..6} v_{n,max} = v_{N,max} \quad 6-8$$

Die genannten Formeln gelten näherungsweise für ein mögliches kleines $\Delta x = |\overline{x_2} - \overline{x_1}|$. Für eine möglichst hohe Auflösung der einzelnen Achsgeschwindigkeiten ist somit ein möglichst kleiner Abstand zwischen den Punkten erforderlich, insbesondere in der y-Richtung im KOS_{OBJ} . Zu beachten ist, dass entlang der Fräsbahn in y-Richtung (KOS_{OBJ}) v_{max} variieren und die limitierende Achse wechseln kann.

Die maximal erreichbare Konstant-Bahngeschwindigkeit $v_{f,konst,max}$, bezogen auf das ganze Untersuchungsvolumen, kann durch die folgende Beziehung bestimmt werden:

$$v_{f,konst,max} = \min v_{max} \quad 6-9$$

Für die vorliegende Analyse wurde analog zur Erreichbarkeitsanalyse der Problemraum diskretisiert. Die Werte sind in Tabelle 6-12 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 6-12: Diskretisierte Werte für die Geschwindigkeitsanalyse

	Wertebereich	Anzahl Gitterpunkte
Moduldicke m_b [mm]	[0; 1032]	21
Modultiefe m_t [mm]	[−108,5; 108,5]	20
Modulhöhe m_h [mm]	[40; 198]	4
Spindelorientierung θ_{TCP} [°]	[−90; 90]	7
Drehtischwinkelstellung θ_7 [°]	[−90; 90]	7

Abbildung 6–22 zeigt für drei Kombinationen aus θ_{TCP} und θ_7 die erreichbaren TCP-Bahngeschwindigkeiten v_{max} für verschiedene Punkte im Untersuchungsvolumen. Sofern alle Punkte im Untersuchungsvolumen erreichbar sind, ist v_{max} ungleich null. Dennoch kann v_{max} aufgrund der Nähe zur Singularität stark vermindert sein, vgl. Abbildung 6–22 (Mitte). Sind Punkte im Untersuchungsvolumen nicht erreichbar, ist v_{max} gleich null, vgl. Abbildung 6–22 (rechts). Ein Beispiel für eine Kombination aus θ_{TCP} und θ_7 , bei der die Erreichbarkeit aller Punkte gegeben ist und keine Singularitätsnähen vorliegen, ist in Abbildung 6–22 (links) dargestellt.

Die maximal erreichbaren Konstant-Bahngeschwindigkeiten $v_{f,konst,max}$ für verschiedene Betriebspunkte (Kombinationen aus θ_{TCP} und θ_7) werden in Abbildung 6–23 gezeigt. Hieraus geht deutlich hervor, dass geeignete Betriebspunkte existieren, bei welchen $v_{f,konst,max}$ schätzungsweise um eine Größenordnung höher liegt als die geforderte maximale Vorschubgeschwindigkeit $v_{f,max} = 0,16 \frac{m}{s}$ (vgl. $\theta_{TCP} = 0^\circ$, $\theta_7 = 90^\circ$).

Weiterhin sind Betriebspunkte mit $v_{f,konst,max} \ll 1$ bzw. $v_{f,konst,max} = 0$ zu beobachten (z. B. $\theta_{TCP} = 0^\circ$, $\theta_7 = 0^\circ$). Dies lässt sich auf die Nichterreichbarkeit (vgl. Kapitel 6.3.2) sowie die Nähe zu Singularitäten von Punkten im Untersuchungsvolumen zurückführen.

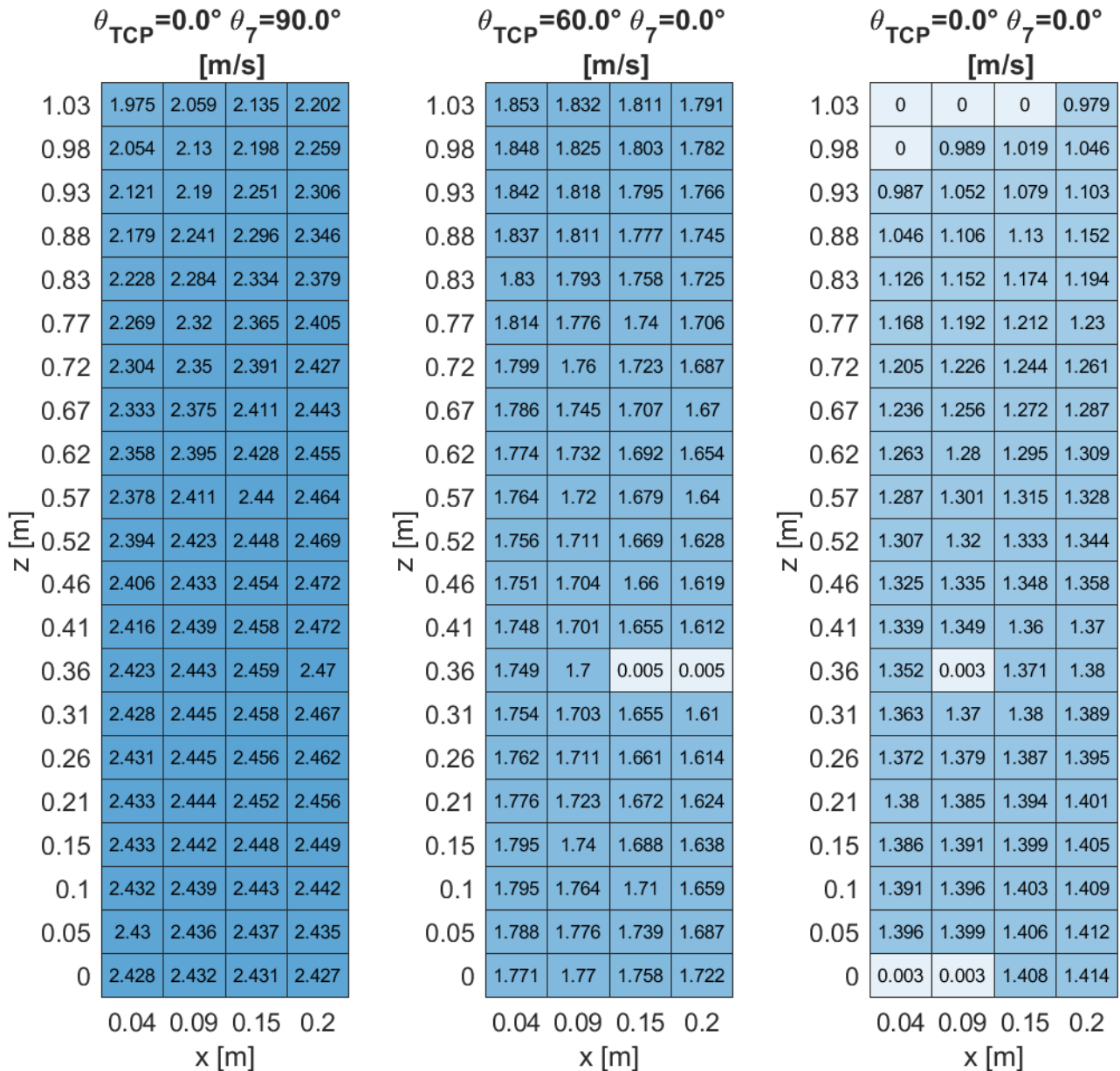


Abbildung 6–22: Erreichbare TCP-Bahngeschwindigkeiten v_{max} für verschiedene Punkte im Untersuchungsvolumen, wobei (links) alle Punkte erreichbar sind und keine Singularitäten vorliegen, (Mitte) Singularitätsnähe vorliegt, (rechts) Singularitätsnähe und nicht erreichbare Punkte vorliegen

		$v_{f,konst,max}$ [m/s]						
θ_7 [°]	90	2.743	0.005	3.024	1.975	1.332	0	0
	60	3.23	3.168	3.054	0.005	3.03	3.129	3.185
	30	0	0	0	1.959	2.956	0.005	2.776
	0	0	0	0	0	1.54	0.005	0
	-30	0	0	0	0	1.094	1.542	1.579
	-60	0	0	0	0	0	0.005	1.832
	-90	0	0	0	0	0	0	0
		-90	-60	-30	0	30	60	90
		θ_{TCP} [°]						

Abbildung 6–23: Maximal erreichbare Konstant-Bahngeschwindigkeiten in y-Richtung, bezogen auf das gesamte Untersuchungsvolumen

Aus der Analyse geht hervor, dass Kombinationen aus θ_{TCP} und θ_7 existieren, bei welchen in allen Punkten im Untersuchungsvolumen das Fräsen mit Vorschub in y-Richtung im KOS_{OBJ} mit der geforderten konstanten Vorschubgeschwindigkeit bis maximal $v_{f,max} = 0,16 \frac{m}{s}$ möglich ist. In diesen Konfigurationen ist die Erreichbarkeit gewährleistet und es liegen keine Singularitäten vor (z. B. $\theta_{TCP} = 30^\circ$, $\theta_7 = -30^\circ$).

6.3.4 Analyse der prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebung

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 dargelegt, weisen 6-Achs-Knickarmroboter im Vergleich zu Werkzeugmaschinen eine deutlich höhere Nachgiebigkeit der Strukturmechanik auf, welche zum größten Teil auf die Getriebe der Achsen zurückzuführen ist. Die vorliegende Prozesskraft führt beim Fräsen zu einer Verschiebung der Werkzeugbahn. Für ein sicheres Trennen der Zellkontaktierungen mittels Fräsen, bei der sich die Bahnabweichungen innerhalb kritischer Grenzen bewegen sollen, wird daher im Folgenden eine modellbasierte Abschätzung der maximalen, prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebung durchgeführt.

Nähere Informationen zum Aufbau des Modells sind in Kapitel 6.3.1 aufgeführt. Die für die Modellierung diskretisierten Parameter können der Tabelle 6-13 entnommen werden (analog zur Erreichbarkeitsanalyse aufgrund ähnlicher Anforderungen).

Tabelle 6-13: Diskretisierte Werte für die Analyse der prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebung

	Wertebereich	Anzahl Gitterpunkte
Moduldicke m_b [mm]	[0; 1032]	20
Modultiefe m_t [mm]	[−108,5; 108,5]	5
Modulhöhe m_h [mm]	[40; 198]	4
Spindelorientierung θ_{TCP} [°]	[0; 90]	4
Drehtischwinkelstellung θ_7 [°]	[0; 90]	4
Vorschubkraftkomponente [N]	[−30; 30]	5
Schnittkraftkomponente [N]	[−100; 100]	5

An dieser Stelle sei betont, dass es sich bei der hier vorgestellten Untersuchung um eine konservative Abschätzung der prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebung handelt, wie sie mit der eingesetzten Roboterkinematik im vorliegenden Anwendungsfall zu erwarten ist. Ziel ist nicht die präzise Vorhersage dieser Verschiebung, wie sie beispielsweise für eine Echtzeit-Kompensation zur Genauigkeitssteuerung erforderlich wäre. Daher sind das genutzte Robotermodell sowie die Vereinfachungen aus Kapitel 6.3.1 im Kontext der Zielsetzung legitim.

Ergebnisse der Simulation der maximalen, prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebung für verschiedene Betriebspunkte sind in Abbildung 6–24 jeweils für die x-, y- und z-Richtung (KOS_{OBJ}) dargestellt.

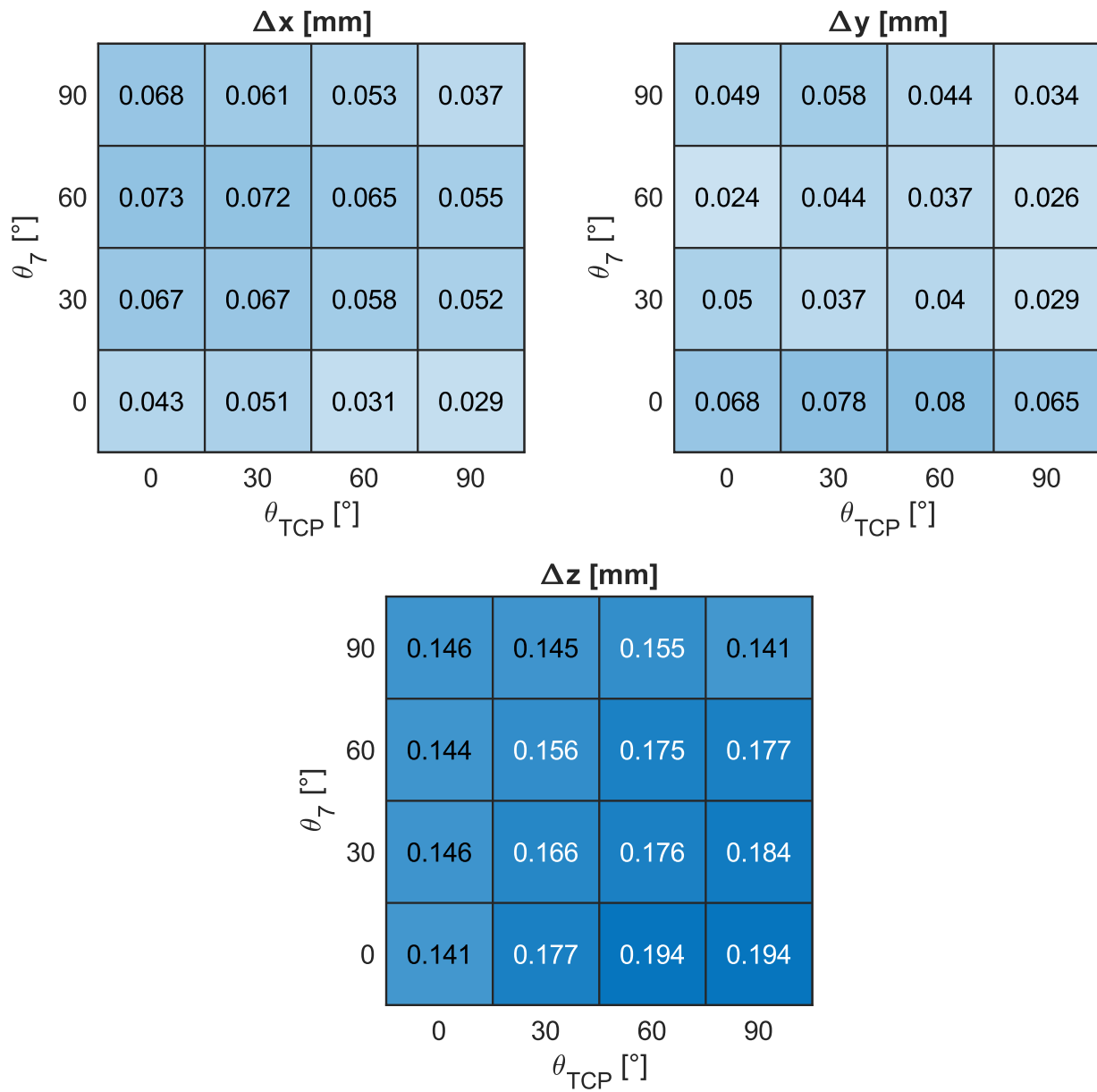


Abbildung 6–24: Maximale, prozesskraftbedingte Werkzeugbahnverschiebung für verschiedene Betriebspunkte in (a) x-Richtung, (b) y-Richtung sowie (c) z-Richtung

Der höchste Anteil der prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebung konnte in z-Richtung mit einem Wert von $\max(\Delta d_z) = 0,194 \text{ mm}$ identifiziert werden. Dies lässt sich auf die betragsmäßig höchste Zerspankraft-Komponente – die Schnittkraft (zeigt in z-Richtung von KOS_{OBJ}) – zurückführen (KOS_{OBJ} in Abbildung 6–19 sowie Abbildung 7–2 dargestellt). Über alle drei Raumrichtungen hinweg ist festzustellen, dass die prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebungen sich in Grenzen halten. Insgesamt wird für den vorliegenden Anwendungsfall unter den gegebenen Randbedingungen eine maximale Verschiebung von $\max(\Delta d) < 0,2 \text{ mm}$ geschätzt. Somit können prozesskraftbedingte Werkzeugbahnverschiebungen beim Trennen von Zellkontaktierungen mittels Fräsen mit der eingesetzten Roboterkinematik vernachlässigt werden.

Als weitere mögliche Ursachen für die statische Werkzeugbahnverschiebung können das Gewicht der Endeffektoren inklusive Peripherie sowie das Gewicht der Roboterglieder ausgemacht werden. Die Werte für diese Größen sind jedoch bekannt und ändern sich während des Prozesses nicht. In Kenntnis der Nachgiebigkeit der einzelnen Achsen lassen sich diese Verschiebungen vorhersagen und kompensieren.

Des Weiteren können dynamische Werkzeugbahnverschiebungen aufgrund von Trägheitskräften bzw. -momenten der Roboterglieder vorliegen, welche während des Trennprozesses mittels Fräsen relevant sein könnten. Während des Fräsens ist mit Vorschubgeschwindigkeiten bis $v_{f,max} = 0,16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ zu rechnen, welche im Vergleich zu den maximal möglichen Werkzeugbahngeschwindigkeiten v_{TCP} im Bereich von $1 \dots 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (vgl. Kapitel 6.3.3) vergleichsweise niedrig sind. Unter der Annahme, dass beim Fräsen Singularitäten und damit hohe Achswinkelgeschwindigkeiten vermieden werden, können Trägheitskräfte beim Trennen der Zellkontaktierungen unter den gegebenen Annahmen vernachlässigt werden.

Weiterhin sei angemerkt, dass bereits industrielle Lösungen wie SINUMERIK Run MyCC /ROCO⁴ existieren, welche Beschleunigungen der einzelnen Roboterachsen kompensieren können. Auch ist die Kompensation von Prozesskräften möglich. Solche Softwarelösungen sind jedoch mit zusätzlichen Kosten verbunden, was zugunsten einer wirtschaftlichen Demontage zu vermeiden ist.

⁴ <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109763706/sinumerik-run-mycc-roco>

7 CAD-basierte Demontageplanung

In Kapitel 2.1.4.2 ist dargelegt, dass zur Abdeckung der hohen Variantenvielfalt bei gleichzeitig wirtschaftlichem Betrieb der Demontageanlage ein beschleunigtes Einrichten der Maschinen beim Umrüsten auf neue Produktvarianten unabdingbar ist. Dies kann beispielsweise durch die automatisierte Generierung des Steuerungscode erfolgen. Wie bereits beschrieben, kann die Code-Generierung auf Basis der geometrischen Information der vorliegenden CAD-Datei des Batteriemoduls erfolgen. Die Identifikation eines stabilen Parameterfensters für den Trennprozess erfolgt durch separat durchgeführte experimentelle Untersuchungen (vgl. Kapitel 6). Zwecks Lokalisierung der Stützpunkte für die Werkzeugbahn am verformungsbehafteten Batteriemodul wird eine nicht-starren Registrierung zwischen 3D-Aufnahmen des Demontageobjekts und der CAD-Datei durchgeführt (vgl. Kapitel 5). Die CAD-basierte Werkzeugbahnplanung und anschließende Steuerungscodegenerierung für das flexible Trennen der Zellkontaktierungen von Lithium-Ionen-Batteriemodulen mittels Fräsen wird nachfolgend näher behandelt. Eine Übersicht der gesamten Verarbeitungspipeline ist in Abbildung 7–1 dargestellt.

Zunächst wird auf die Planung der Werkzeugbahn eingegangen, die sich zum Ziel setzt, automatisiert Stützpunkte für die Fräsbahn an den einzelnen Busbars der Zellkontaktierung aus der CAD-Datei zu extrahieren. Dies bildet die Grundlage für die parametrisierte Trajektorienplanung für den 6-Achs-Knickarmroboter. Weiterhin wird auf die Integration der kamerabasierten Verformungserfassung mittels 3D-Kamera Bezug genommen. Im Anschluss werden Ansätze zur Produktivitätssteigerung durch Optimierung offener Parameter, wie z. B. die Reihenfolge der Zellkontaktierungen, vorgestellt. Anschließend wird der Codegenerator zur Generierung des NC-Codes präsentiert.

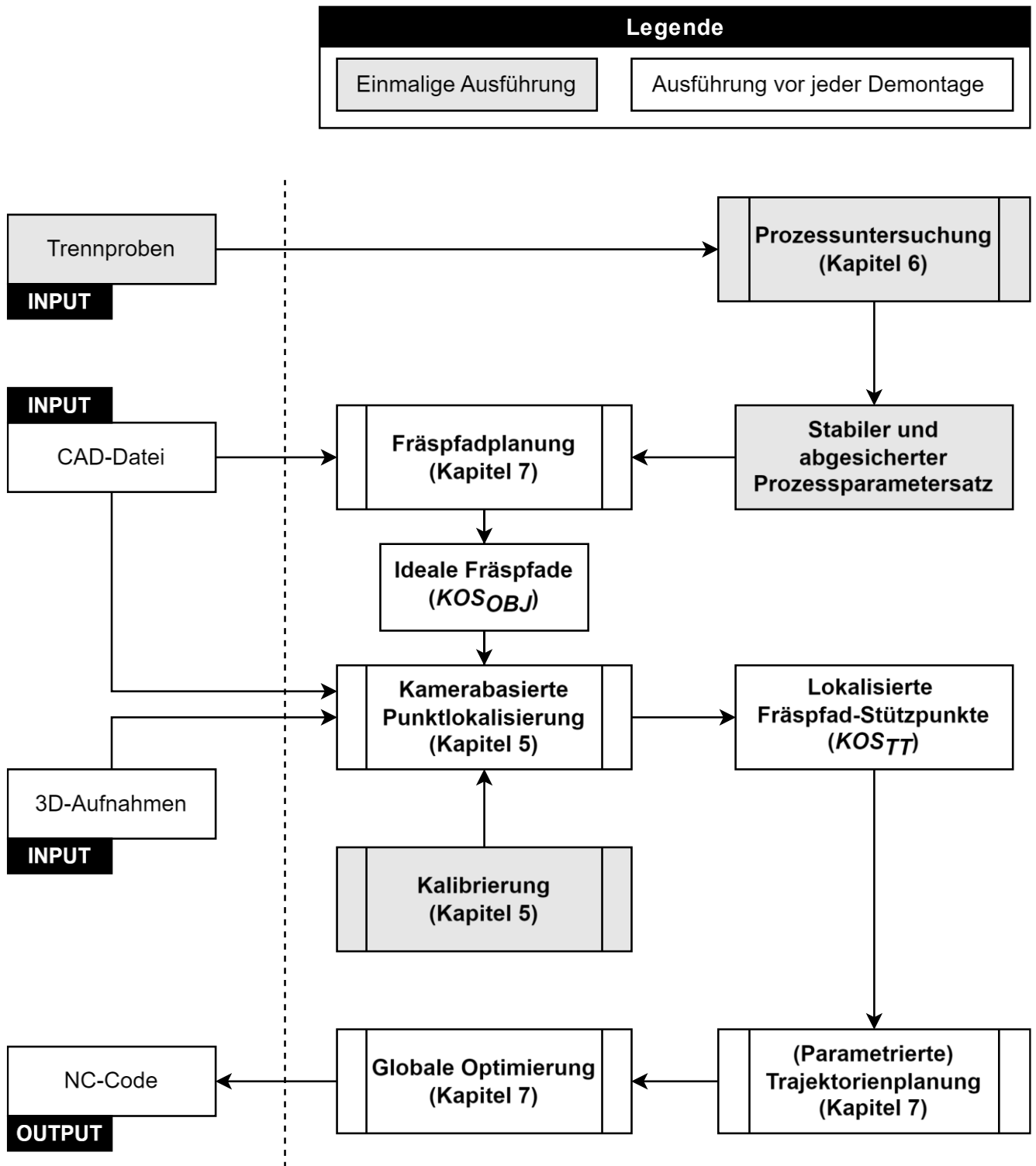


Abbildung 7–1: Übersicht der Verarbeitungspipeline für das automatisierte und flexible Trennen der Zellkontaktierungen

7.1 CAD-basierte Fräsbahnplanung

Die Grundlage für die Codegenerierung stellt das zur Verfügung stehende, geometrische Modell des Batteriemoduls in Form einer CAD-Datei dar. Auf Basis der Datei können Fräsbahnen an den Busbars der Zellkontaktierungen ermittelt werden. Im Speziellen sind die Stützpunkte der genannten Fräsbahnen von Interesse. Ein Ansatz für die automatisierte Extraktion der Stützpunkte für die Fräsbahnen aus der CAD-Datei ist im Rahmen der Arbeit von (A_Richter 2023) entstanden und wird nachfolgend zusammengefasst dargelegt.

Voraussetzung für die CAD-Datei ist, dass sie im STEP-Format vorliegt. Jede Komponente soll im Produktbaum als ein eigenständiges Objekt aufgeführt sein und als Volumenkörper, beispielsweise in Boundary Representation, abgebildet werden (vgl. Kapitel 2.3.2).

Hinsichtlich des Batteriemoduls werden folgende Annahmen getroffen (vgl. auch Kapitel 4.1):

- Maximal zwölf Zellen sind einreihig gestapelt und elektrisch seriell kontaktiert.
- Alle Zellkontaktierungen befinden sich auf einer Seite der Mantelfläche.
- Busbars sind (umgeformte) Blechteile mit konstanter Dichte.
- Busbars sind Bauteile mit identischer Geometrie und gleicher Orientierung.
- Busbars sind in einem definierten Muster angeordnet.
- Geometrische Mittelpunkte (entsprechen den Massenmittelpunkten) der Busbars liegen auf zwei Reihen entlang jeweils einer Gerade parallel zur Einspannachse.

Wie bereits in Kapitel 4.2.1 diskutiert, stellt der lineare Schnitt entlang der Symmetrieachse an der Busbar einen zu bevorzugenden Frässchnitt dar (vgl. Abbildung 4–8), der im Folgenden näher betrachtet wird.

Das Koordinatensystem des Werkstücks (siehe Abbildung 7–2) lässt sich, ausgehend vom ursprünglichen Koordinatensystem der CAD-Datei, wie folgt eindeutig bestimmen:

1. Es wird ein quaderförmiger, achsenorientierter Hüllkörper (engl.: Bounding-Box) um das Werkstück aufgespannt.
2. Der Mittelpunkt einer von beiden Einspann-Stirnflächen sowie die Zell-Stapelrichtung definieren den **Ursprung** und die **z-Achse**.

3. Die **x-Achse** ist orthogonal zur Ebene mit den geometrischen Mittelpunkten der Busbars angeordnet. Diese ist so orientiert, dass die Busbar-Mittelpunkte einen positiven Wert für die Position in x-Richtung aufweisen.
4. Im vorliegenden rechtshändigen kartesischen Koordinatensystem lässt sich die **y-Achse** bestimmen.

Da es sich beim Batteriemodul in Stapelrichtung (z-Richtung) um ein quasi-achsensymmetrisches Objekt handelt, ist die Wahl des Ursprungs auf einer der beiden Einspann-Stirnflächen offen und kann beispielsweise durch Benutzerinteraktion mit dem Maschineneinrichter getroffen werden. Ein Vorschlag für eine eindeutige Batteriemodulorientierung wäre, dass mehr Busbars mit negativem y-Wert für den Mittelpunkt vorliegen als mit positiven. Diese Konvention wird im Folgenden eingehalten.

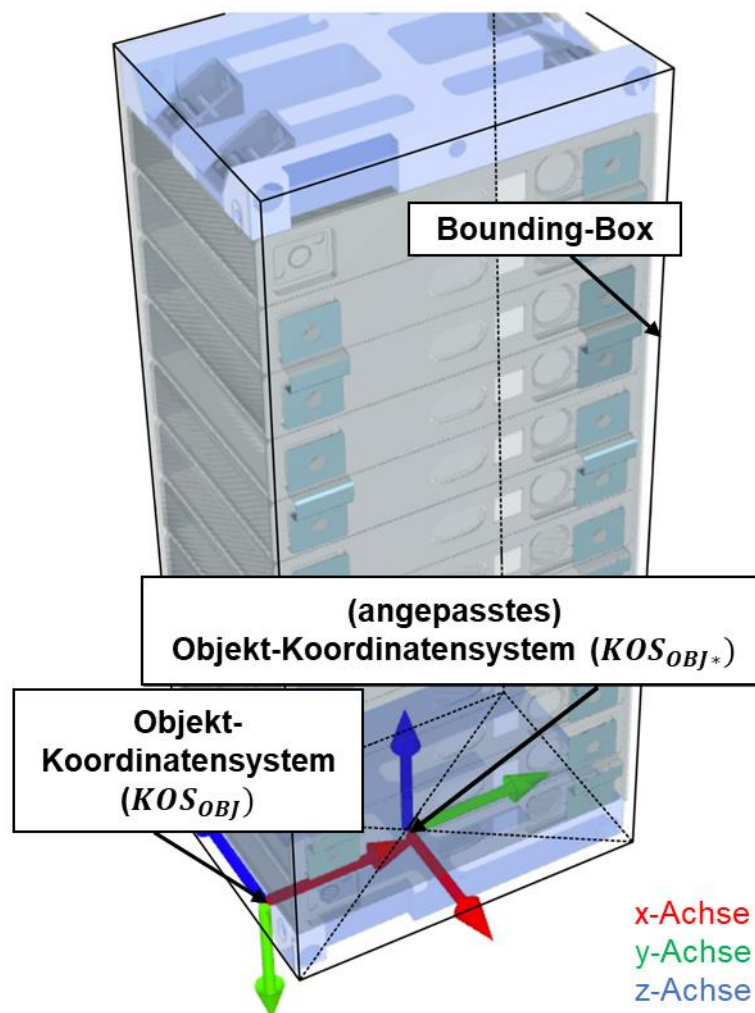


Abbildung 7–2: Werkstück-Koordinatensystem KOS_{OBJ} angelehnt an (A_Richter 2023)

Abbildung 7–3 zeigt eine seitliche Ansicht der Fräsbahn für eine Busbar, aufgespannt durch vier Stützpunkte p_0, p_1, p_2, p_3 . Das Werkzeug ist parallel zur x-Achse (KOS_{OBJ}) anzuordnen. p_1 und p_2 stellen Start- und Endpunkte der Fräsoption dar. p_0 und p_3 sind als Rückzugspunkte der Fräsoption anzusehen. Insgesamt sind für einen Busbarzyklus drei lineare Bewegungen (engl.: Continuous-path, kurz: CP) erforderlich: (1) Eintauchen, (2) Fräsen, (3) Rückzug. (1) und (3) zeigen keine besonderen Anforderungen an das Geschwindigkeitsprofil der Werkzeugbahn und können daher als Eilgang (NC-Befehl G0) ausgeführt werden. Das Fräsen erfordert, wie in Kapitel 6.1.1 dargelegt, eine konstante Bahngeschwindigkeit und sollte daher als Vorschubbewegung (NC-Befehl G1) mit vorgegebener Vorschubgeschwindigkeit ausgeführt werden.

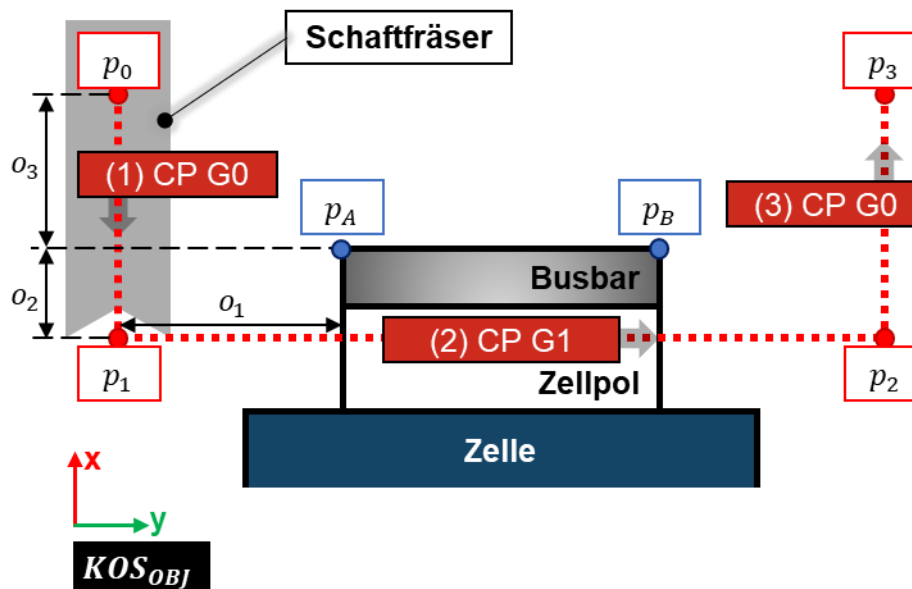


Abbildung 7–3: Fräsbahn (rot markiert) mit den vier Stützpunkten an einer Busbar angelehnt an (A_Richter 2023)

Beim Offset, welcher durch Benutzerinteraktion vorgegeben ist, wird unterschieden zwischen:

- Offset o_1 (Eintauchabstand): Versatz des Start- bzw. Endpunkts entlang der y-Achse (KOS_{OBJ}) weg von der Busbar, um einen seitlichen Anschnitt in die Busbar zu ermöglichen. Der Wert sollte höher als die Summe der Hälfte des Werkzeugdurchmessers d_w sein ($o_1 > \frac{d_w}{2}$).
- Offset o_2 (Eintauchtiefe): Versatz in negativer x-Richtung, womit ein vollständiges Eintauchen und ein Schnitt durch die Busbar sichergestellt werden. Der Wert sollte höher als die Busbardicke b_d und kleiner als die Summe der Busbardicke b_d und Zellpolhöhe p_h sein ($b_d < o_2 < b_d + p_h$).

- Offset o_3 (Rückzugshöhe): Versatz in positiver x-Richtung, was den Werkzeugrückzug darstellt. Der Wert sollte so gewählt sein, dass die Rückzugspunkte p_0 und p_3 außerhalb der Bounding-Box des Werkstücks (vgl. Abbildung 7–2) liegen und es somit zu keinen Kollisionen zwischen Werkzeugspitze und Werkstück während der Bewegung zwischen den Busbars kommen kann.

Beim Trennen der Zellkontaktierungen mittels Fräsen wird von einem konstanten Wert für die Drehtischwinkelstellung θ_7 während der gesamten Bearbeitung ausgegangen.

Die Pipeline für die CAD-basierte Fräsbahnplanung kann in die zwei wesentlichen Schritte (1) Identifikation der Busbars sowie (2) Ableiten der Stützpunkte der Fräspfade unterteilt werden, welche im Folgenden näher beschrieben werden.

Identifikation der Busbars

Die Identifikation der Busbars der Zellkontaktierung erfolgt regelbasiert. Die Grundlagen hierzu sind die zu Beginn dieses Kapitels vorgestellten Annahmen. Die grundlegenden Schritte für die Identifikation sind:

- Identifikation von identischen Komponenten auf Basis der Volumenangabe und anschließendem Sammeln in Form einer (Klassen-)Liste von identischen Komponenten
- Entfernen von Duplikationen durch Identifikation von identischen Komponenten mit gleicher Position und Orientierung
- Überprüfung jeder Liste mit identischen Komponenten auf die Bedingungen:
 - Geometrische Mittelpunkte können durch zwei Geraden, die auf einer Ebene liegen, abgebildet werden
 - Anzahl der Komponenten entspricht der Anzahl der Zellen $+1$, Vorgabe der Zellanzahl erfolgt durch Benutzerinteraktion
 - Volumen-Oberflächenverhältnis $\frac{V}{A} = \frac{b \cdot l \cdot d}{2 \cdot (l \cdot b + l \cdot d + b \cdot d)} = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{b} + \frac{1}{l} \right)^{-1}$ entspricht für $d \ll b$ sowie $d \ll l$ schätzungsweise der Hälfte der Blechdicke $\frac{1}{2} * \left(\frac{1}{d} \right)^{-1} = \frac{d}{2}$; Werte für die Blechdicke könnten gemäß (Das et al. 2019) zwischen 1,0 mm und 2,5 mm liegen

Idealerweise bleibt eine Liste mit identischen Komponenten übrig, welche die Busbars darstellen sollten. Bleiben mehrere Listen nach dem stufenweisen Auswahlverfahren übrig, kann beispielsweise durch Benutzerinteraktion die passende Liste ausgewählt

werden. Für den Fall, dass keine Liste übrig bleibt, sollte das vorliegende Batteriemodul in Bezug zu den getroffenen Annahmen überprüft werden. Auf Basis der identifizierten Busbars kann nachfolgend das Ableiten der Fräspfad-Stützpunkte erfolgen.

Ableiten der Stützpunkte der Fräspfade

Das Ableiten der Stützpunkte der Fräspfade wird exemplarisch an einer Busbar durchgeführt und kann auf die restlichen Busbars unter Kenntnis der Differenzen der geometrischen Mittelpunkte übertragen werden. Zur Bestimmung der Fräspfade wird der geometrische Körper an der Spiegelebene parallel zur x-y-Ebene (KOS_{OBJ}) geschnitten. Die Spiegelebene enthält den geometrischen Mittelpunkt und ist senkrecht zur z-Achse (KOS_{OBJ}) orientiert. Aus dem Schnitt resultiert eine zweidimensionale Kontur, die durch ein minimal umgebendes Rechteck mit den Eckpunkten v_1 , v_2 , v_3 und v_4 umschlossen wird (siehe Abbildung 7–4).

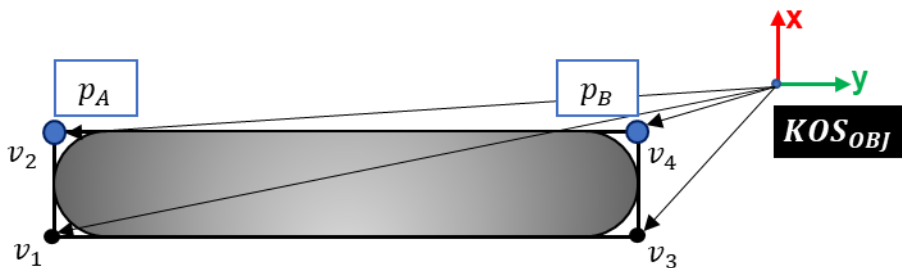


Abbildung 7–4: Minimal umgebendes Schnittrechteck an einer Busbar angelehnt an (A_Richter 2023)

Aus $v_2 = p_A$ und $v_4 = p_B$ als Punkte mit dem höchsten Wert für die y-Position (vgl. Abbildung 7–3) sowie aus den Offsetparametern o_1 , o_2 , o_3 werden die Fräsbahn-Stützpunkte p_0 , p_1 , p_2 , p_3 bestimmt. Die Wahl von p_0 bzw. p_3 als Start- bzw. Endpunkt für einen Busbarzyklus ist durch die vorgegebene Fräsrichtung an der i-ten Busbar $c_{d,i}$ definiert.

Aus den einzelnen Busbarzyklen kann eine Gesamtbewegung zusammengesetzt werden (vgl. Abbildung 7–5), was die Grundlage für die anschließende NC-Codegenerierung bildet.

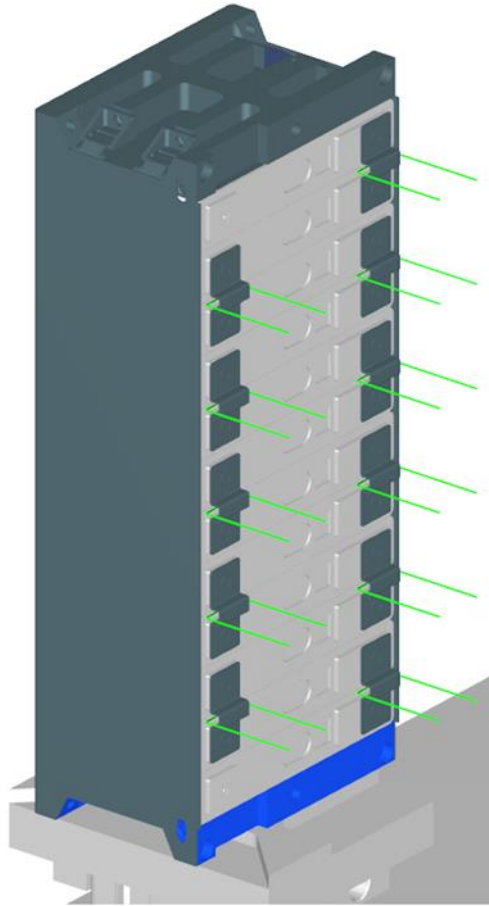


Abbildung 7–5: Fräspfade zum Trennen der Zellkontaktierungen an einem Batteriemodul (A_Richter 2023)

Sofern die Variantenvielfalt sich in Grenzen hält und Fräsoperationen auf einer Ebene erforderlich sind, kann die Bearbeitung statt durch den 6-Achs-Knickarmroboter mit einer Frässpindel in einer konventionellen 3-Achs-Werkzeugmaschine erfolgen. Die Vorteile hierbei sind die deutlich höheren Steifigkeiten und damit niedrigere Werkzeugbahnverschiebungen durch die Prozesskraft sowie der Wegfall von Singularitäten. Dennoch ist die kamerabasierte Verformungserfassung mithilfe einer 3D-Kamera aufgrund der geometrischen Schwankungen (vgl. Kapitel 4.1.4) inklusive der Lokalisierung der Stützpunkte für die Werkzeugbahn unabdingbar. Nachteilig beim Einsatz einer Werkzeugmaschine ist, dass eine zusätzliche Kinematik erforderlich ist, wie beispielsweise ein 6-Achs-Knickarmroboter für das Be- und Entladen.

7.2 Trajektorienplanung und Generierung des Steuerungscode

Im vorherigen Kapitel wurde ein Ansatz zur Extraktion von Fräsbahn-Stützpunkten aus der CAD-Datei vorgestellt. Zur Umsetzung einer Bewegung des 6-Achs-Knickarmroboters mit Frässpindel in der vorgestellten flexiblen Demontageanlage (vgl. Kapitel 4.4) ist eine Trajektorienplanung des Roboters erforderlich, welche nachfolgend näher beschrieben wird. Die Robotertrajektorien mit definierten Bewegungsbahnen bilden die Basis für die anschließende Generierung des Steuerungscode.

Die Anforderungen für die Robotertrajektorien zum Trennen der Zellkontaktierungen mittels Fräsen sind nachfolgend zusammengefasst aufgeführt:

- Erreichbarkeit der Zielpunkte unter Berücksichtigung der vorliegenden Kinematik und Achsgrenzen (vgl. Kapitel 6.3.2)
- Konstante Werkzeugbahngeschwindigkeit und Vermeidung von Singularitäten während des Fräsprozesses (vgl. Kapitel 6.3.3)
- Vermeidung von Kollisionen

Relevante Zielpunkte, die vom Roboter angefahren werden müssen, sind:

- p_{home} Home-Position als Start- und Endposition
- $p_{X,n}^{OBJ}$ als Stützpunkte mit $X=\{0,1,2,3\}$ an der n-ten Busbar

Zu beachten ist, dass die Punkte p^{OBJ} im Werkstück-Koordinatensystem KOS_{OBJ} vorliegen. Die Umrechnung in das Roboterbasis-Koordinatensystem KOS_{ROB} erfolgt durch Multiplikation mit der homogenen Transformationsmatrix M_{ROB}^{OBJ} gemäß:

$$p^{ROB} = M_{ROB}^{OBJ} * p^{OBJ} \quad 7-1$$

Die Anforderung eines senkrechten Frässchnitts (vgl. Kapitel 4.2.3) bedingt, dass das Werkzeug so zu orientieren ist, dass die Rotationsachse des Fräswerkzeugs (z-Achse im KOS_{TCP}) in negativer Richtung der x-Achse im KOS_{OBJ} zeigt. Kartesische Zielkoordinaten p mit Vorgabe der Werkzeugorientierung können mittels Rücktransformation numerisch in die Achswinkelstellung q umgerechnet werden (Verweis auf Kapitel 6.3.1), sofern der Punkt mit vorgegebener Orientierung erreichbar ist.

Mit Vorgabe der

- Reihenfolge der Zellkontaktierungen,
- Fräsrichtung an jeder Zellkontaktierung,
- Spindelorientierung θ_{TCP} ,
- Drehtischwinkelstellung θ_7

können die Robotertrajektorien aus einzelnen Bewegungen zusammengesetzt werden. Die Einzelbewegungen sowie deren Charakteristika sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst dargestellt. p_0 wird nachfolgend als Startposition definiert, p_3 ist folglich als die Endposition bei einer Zellkontaktierung definiert.

Tabelle 7-1: Verschiedene Arten der Einzelbewegung

Beschreibung	Zielposition	Geschwindigkeit	Bewegungsart
Home-Position	p_{home}	G0	PTP
Start	p_0	G0	PTP
Eintauchen	p_1	G0	CP
Fräsen	p_2	G1	CP
Rückzug	p_3	G0	CP

Wie bereits in Kapitel 4.4 erwähnt, handelt es um eine Robotersteuerung auf Basis der CNC-Steuerung SINUMERIK One. Eine Liste der in dieser Arbeit verwendeten NC-Befehle und deren Bedeutung findet sich in Tabelle 7-2.

Tabelle 7-2: Genutzte NC-Befehle in der SINUMERIK One (SIEMENS 2022; SIEMENS 2024)

NC-Befehl	Bedeutung
M3	Spindel einschalten, rechtsdrehend
M5	Spindel ausschalten
S.... (z. B. S6000)	Spindeldrehzahl [U/min]
F.... (z. B. F2500)	Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]
G0 RA7=...	Drehung des Drehtisches mit Angabe der Winkelstellung
G0 PTP RA1=.. RA2=.. RA3=.. RA4=.. RA5=.. RA6=..	PTP-Eilgangbewegung (Angabe der Ziel-Gelenkwinkelstellung)
G0 CP X=.. Y=.. Z=.. A=.. B=.. C=..	CP-Eilgangbewegung (Angabe der Ziel-TCP-Position sowie -Orientierung)
G1 CP X=.. Y=.. Z=.. A=.. B=.. C=..	CP mit konstanter Bahngeschwindigkeit (Angabe der Ziel-TCP-Position sowie -Orientierung)

Point-to-point (PTP) bezeichnet im vorliegenden Fall eine synchrone Punkt-zu-Punkt-Bewegung ungeachtet der Form der TCP-Bahn. Bei einer Continuous-path (CP)-Bewegung wird hingegen eine lineare TCP-Bahn eingehalten. G0 kennzeichnet eine Eilgangbewegung mit maximalen Roboterachsgeschwindigkeiten sowie -beschleunigungen. G1 stellt eine Geradeninterpolation dar, bei welcher eine lineare TCP-Bewegung mit vorgegebener Bahngeschwindigkeit ausgeführt wird. Für weiterführende Informationen wird auf (Weber 2019) sowie (SIEMENS 2022) verwiesen.

Die Generierung des vollständigen NC-Codes erfolgt mittels Befehlsschablonen, welche durch Parametrierung und Aneinanderreihung zu einem gesamten Code zusammengeführt werden.

7.3 Globale Optimierung der Gesamtprozesszeit

Für das Trennen der Zellkontaktierungen in der vorliegenden Konfiguration erstreckt sich ein unendlicher Lösungsraum in Bezug zu offenen Variablen (wie Spindelorientierung oder Drehtischwinkelstellung), welche jeweils in unterschiedliche Gesamtprozesszeiten münden. Weiterhin liegen Konfigurationen vor, in welchen das Trennen, bedingt durch kinematische Einschränkungen, wie fehlende Zugänglichkeit an Stützpunkten, nicht möglich ist. Das vorliegende Kapitel präsentiert einen Ansatz zur Ermittlung eines optimalen Parametersatzes zur Reduzierung der Gesamtprozesszeit unter Berücksichtigung von kinematischen Einschränkungen.

7.3.1 Definition Optimierungsproblem

Die zu optimierende Zielfunktion bzw. Fitnessfunktion stellt im vorliegenden Fall die Gesamtprozesszeit t_{all} unter Berücksichtigung der kinematischen Einschränkung dar. Die Zeit t_{all} setzt sich aus den Zeiten t_n für die einzelnen Bahnabschnitte n mit unterschiedlichen Bewegungsarten, wie Punkt-zu-Punkt, zusammen (vgl. Kapitel 7.2):

$$t_{all} = \sum t_n \quad 7-2$$

Es wird zwischen den drei Bewegungsarten einschließlich Geschwindigkeitsprofilen G0 PTP (Eilgang Punkt-zu-Punkt), G0 CP (Eilgang Linearfahrt) sowie G1 CP (Konstanter Vorschub Linearfahrt) unterschieden, welche jeweils eine eigene Berechnungsvorschrift für die Bahnzeiten erfordern. Diese sind angelehnt an (Weber 2019) und zusammengefasst dargestellt in Tabelle 7-3. Beschleunigungen sind hierbei aus Vereinfachungsgründen nicht berücksichtigt.

Tabelle 7-3: Berechnungsvorschriften für die Zeitdauer

Bewe- gungsart	Berechnungsvor- schrift	Kommentar
G0 PTP	$t_n^{G0,PTP} = \max\{\frac{\Delta\theta_i}{\omega_i^{max}}\}$	Maximaler Wert des Quotienten aus Winkeldifferenz und maximaler Achswinkelgeschwindigkeit an jeder Achse
G0 CP	$t_n^{G0,CP} = \sum t_n^{G0,PTP}$	Summe der einzelnen Zeiten jeder einzelnen inkrementellen G0 PTP-Bewegung entlang einer linearen Bahn
G1 CP	$t_n^{G1,CP} = \frac{ \Delta\bar{p} }{v_f}$	Quotient aus euklidischem Abstand zwischen beiden Stützpunkten sowie der Vorschubgeschwindigkeit

Alle betrachteten Optimierungsvariablen sowie der jeweilige Wertebereich sind in Tabelle 7-4 enthalten. Der Wert $c_{d,i} = 0$ für die Fräsrichtung zeigt an, dass der i -te Frätschnitt in positiver y-Richtung im KOS_{OBJ} erfolgt, während $c_{d,i} = 1$ einen Schnitt in negativer y-Richtung kennzeichnet.

Tabelle 7-4: Auflistung der Optimierungsvariablen

Optimierungsvariablen	Wertebereich
Busbar-Reihenfolge c_o [-]	(diskret) $\{1 \dots z\}^z$
Fräsrichtungen c_d [-]	(diskret) $\{0, 1\}^z$
Spindelorientierung θ_{TCP} [°]	(kontinuierlich) $[-90; 90]$
Drehtischwinkelstellung θ_7 [°]	(kontinuierlich) $[-90; 90]$

Die Kombination aus Busbar-Reihenfolge und Fräsrichtungen kann durch einen musterbasierten Ansatz eingeschränkt werden, wie im Folgenden erläutert wird.

7.3.2 Vorooptimierung der Busbar-Reihenfolge und der Fräsrichtungen

Eine Möglichkeit zur Eingrenzung des Lösungsraums vor der holistischen, globalen Optimierung ist die Identifikation einer optimalen Werkzeugbahn, welche die Busbarreihenfolge sowie die jeweiligen Fräsrichtungen in y-Achse im KOS_{OBJ} beinhaltet. Eine optimale Werkzeugbahn weist unter Vernachlässigung der Roboterkinematik während des Trennens der Zellkontaktierung die geringste Gesamtprozessdauer auf. Bei Berücksichtigung der Kinematik wird jedoch davon ausgegangen, dass die maximale Werkzeugbahngeschwindigkeit im betrachteten Bearbeitungsraum möglichst konstant

ist. Singularitäten und die damit verbundene Reduzierung der maximalen Werkzeugbahngeschwindigkeit werden hierbei ausgeschlossen. Mit dieser Annahme ist die Gesamtstrecke der Werkzeugbahn während der gesamten Bewegung näherungsweise linear zur Gesamtprozessdauer.

Somit liegt bei der Optimierung ein sogenanntes Traveling Salesman-Problem vor, das die Suche nach dem kürzesten Pfad zum Ziel hat. Da es sich in x-Richtung im KOS_{OBJ} um die gleiche Bewegung mit einer konstanten Länge handelt, kann das Problem auf einen 2D-Fall reduziert werden. Das Trennproblem ist in Abbildung 7–6 visualisiert. Es gilt, die Enden (rote Kreuze) der linearen Trennschnitte (rote Linien) miteinander zu verbinden, sodass diese eine zusammenhängende Kette ergeben. Zwei Enden werden jeweils als globaler Start- und Endpunkt definiert.

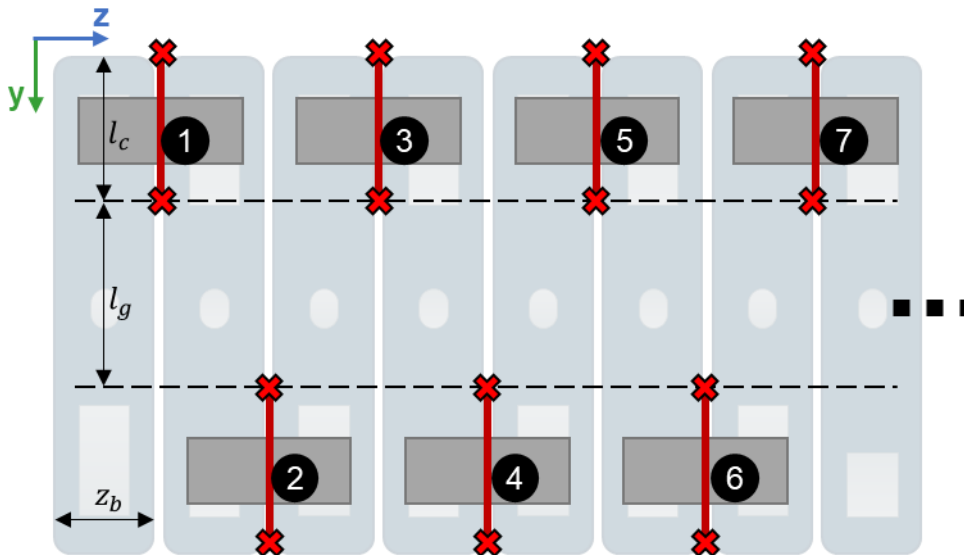


Abbildung 7–6: Optimierung bei der Fräsbahnfindung als Traveling Salesman-Problem

Als Kandidaten für eine optimale Lösung können zwei grundlegende Muster identifiziert werden, welche in Abbildung 7–7 dargestellt sind:

- (1) Bumerang: Lösen der Verbindungen in der ersten Busbar-Reihe, danach in der zweiten Reihe (in umgekehrter Richtung)
- (2) Mäander: Mäanderförmiges (abwechselndes) Lösen der Busbars in beiden Reihen

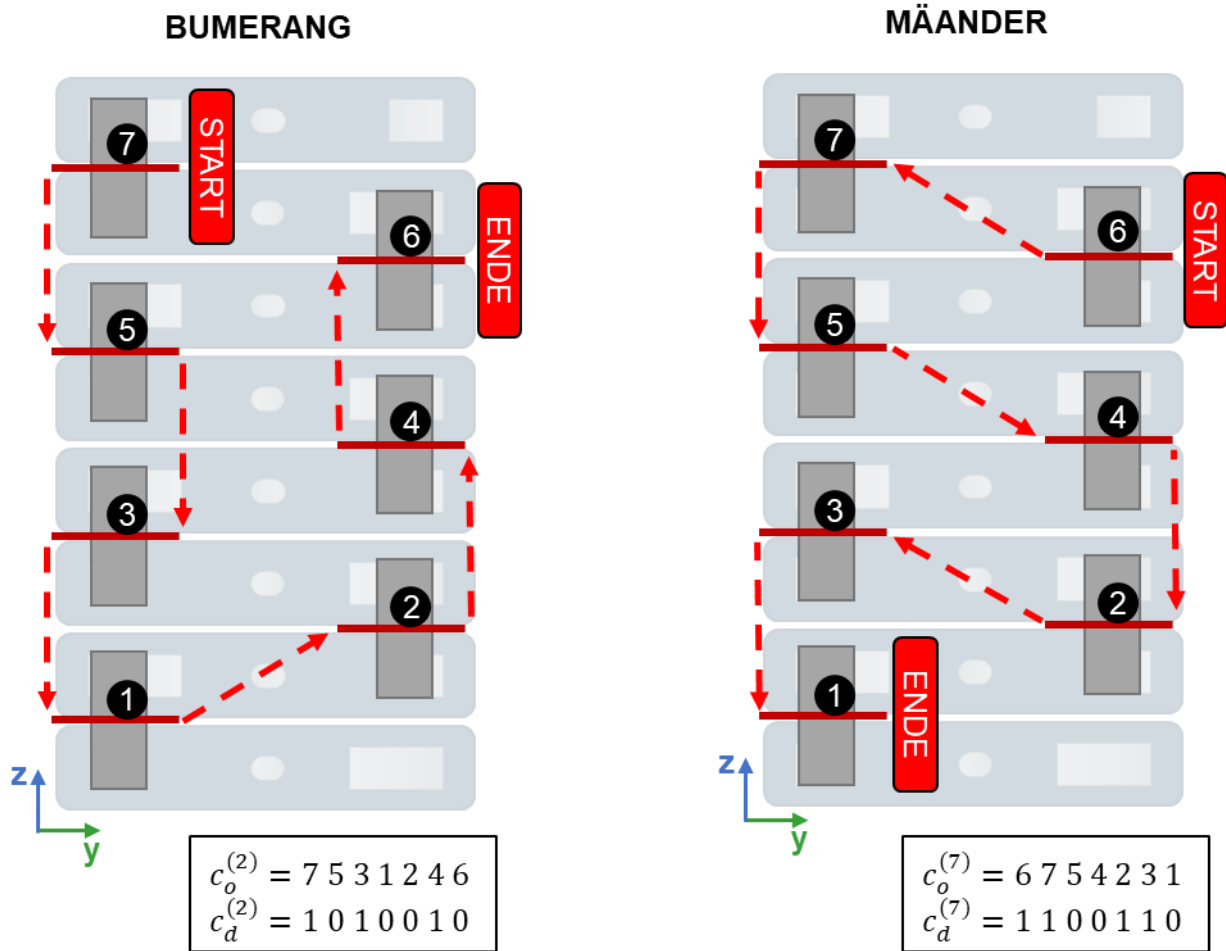


Abbildung 7-7: Beide optimalen Muster für die Busbar-Reihenfolge

Am Beispiel des Bumerang-Musters (vgl. Abbildung 7-7, links) wird Codierung $c_d^{(2)} = 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0$ sowie $c_o^{(2)} = 7 \ 5 \ 3 \ 1 \ 2 \ 4 \ 6$ für die Reihenfolge-Fräsrichtungen-Kombination (2) erläutert: Im ersten Schritt wird Busbar 7 ($c_{o,1}^{(2)} = 7$) durch einen Schnitt in negativer y-Richtung im KOS_{OBJ} ($c_{d,1}^{(2)} = 1$) getrennt. Im zweiten Schritt folgt Busbar 5 ($c_{o,2}^{(2)} = 5$) mit einem Schnitt in positiver y-Richtung ($c_{d,2}^{(2)} = 0$)...

Die Vorschrift für die Berechnung der Gesamtstrecke sowohl für das (1) Bumerang-Muster (L_{boo}) als auch für das (2) mäanderförmige Muster (L_{mea}) ist gegeben durch

$$(1) \quad L_{boo} = (n - 2) * 2z_b + \sqrt{(l_g)^2 + (z_b)^2} + n * l_c \quad 7-3$$

$$(2) \quad L_{mea} = \frac{(n-1)}{2} * 2z_b + \frac{(n-1)}{2} * \sqrt{(l_g)^2 + (z_b)^2} + n * l_c \quad 7-4$$

mit n_b für die Anzahl an Busbars,

l_c für die Frässtrecke,
 z_b für die Breite der Zelle sowie
 l_g für die Länge der Lücke.

Für

$$2 * z_b = \sqrt{(l_g)^2 + (z_b)^2} \quad \text{bzw.} \quad \sqrt{3} * z_b = l_g \quad 7-5$$

besteht Gleichheit der beiden Gesamtstrecken $L_{boo} = L_{mea}$.

Wenn $\sqrt{3} * z_b < l_g$ gilt, ist das (1) Bumerang-Muster aufgrund der geringeren Gesamtstrecke zu bevorzugen. Falls $\sqrt{3} * z_b > l_g$ gilt, wird die Wahl des (2) mäanderförmigen Musters angeraten.

Die in Formel 7-5 gezeigte Grenzbeziehung kann durch einen Grenzwinkel angegeben werden: Bei einem Winkel von $\alpha_g = \arctan\left(\frac{z_b}{l_g}\right) = \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = 30^\circ$ besteht die Gleichheit der Gesamtstrecken beider Muster.

Alle acht möglichen, optimalen Varianten für die Busbar-Reihenfolge c_o und Fräsrichtungen c_d sind in codierter Form in Tabelle 7-5 aufgelistet.

Tabelle 7-5: Acht mögliche, optimale Varianten in codierter Form für die Busbar-Reihenfolge sowie Fräsrichtungen

Index	Bumerang-Muster	Index	Mäander-Muster
(1)	$c_d^{(1)}$ 1 0 1 0 1 0... ...0 1 0 1 0 $c_o^{(1)}$ 1 3 5 7 9 11... ...10 8 4 2	(5)	$c_d^{(5)}$ 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0... $c_o^{(5)}$ 1 3 2 4 5 7 6 8 9 11 10...
(2)	$c_d^{(2)}$ 1 0 1 0 1 0... ...0 1 0 1 0 $c_o^{(2)}$...11 9 7 5 3 1 2 4 6 8 10...	(6)	$c_d^{(6)}$ 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0... $c_o^{(6)}$...11 9 10 8 7 5 6 4 3 1 2
(3)	$c_d^{(3)}$ 1 0 1 0 11 0 1 0 1 0 $c_o^{(3)}$ 2 4 8 10... ... 11 9 7 5 3 1	(7)	$c_d^{(7)}$...1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 $c_o^{(7)}$...10 11 9 8 6 7 5 4 2 3 1
(4)	$c_d^{(4)}$ 1 0 1 0 11 0 1 0 1 0 $c_o^{(4)}$...10 8 6 4 2 1 3 5 7 9 11...	(8)	$c_d^{(8)}$...1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 $c_o^{(8)}$ 2 1 3 4 6 5 7 8 10 9 11...

Trotz einer optimalen Fräsbahn kann es beim eingesetzten 6-Achs-Knickarmroboter vorkommen, dass auf der Werkzeugbahn Punkte in der Nähe zu Singularitäten liegen und damit Geschwindigkeitsverluste auftreten. Daher ist es sinnvoll, einen holistischen

Ansatz unter gleichzeitiger Berücksichtigung aller vier Optimierungsparameter zu verfolgen. Hierbei liegen die Parameter Busbar-Reihenfolge c_o sowie Fräsrichtungen c_d in Form von voroptimierten Kombinationen mit Index (1)...(8) vor, wie in Tabelle 7-5 dargestellt, mit dem Ziel, die globale Optimierung zu beschleunigen. Nachfolgend werden ein Vergleich und die Auswahl des geeignetsten Optimierungsverfahrens vorgenommen.

7.3.3 Vergleich der Optimierungsverfahren

Innerhalb des Kapitels werden drei passende Optimierungsverfahren auf Basis des Optimierungsproblems vorausgewählt und miteinander verglichen. Als Fitness-Wert wird der Kehrwert der Gesamtzeit t_{all} herangezogen, sofern für die aktuelle Parameterkombination

- (1) alle Punkte für die Werkzeugspitze erreichbar sind (Achswinkelstellung innerhalb der mechanischen Grenzen) und
- (2) die erforderlichen Vorschubgeschwindigkeiten während des Fräsens eingehalten werden können.

Ansonsten erhält die Parameterkombination den Fitness-Wert 0. Aspekte wie Kollisionen, Belastbarkeit der Kabeldurchführungen usw. sind hierbei von der Betrachtung ausgeschlossen und müssen für jede Parameterkonfiguration gesondert geprüft werden.

Zu optimieren sind die Spindelorientierung θ_{TCP} sowie die Drehtischwinkelstellung θ_7 bei gleichzeitiger Berücksichtigung der acht optimalen Kombinationen aus Busbar-Reihenfolge und Fräsrichtungen. Der Optimierungsraum wird beispielhaft für fixe Busbar-Reihenfolge/Fräsrichtungen in Abbildung 7–8 aufgezeigt. Im Optimierungsraum können drei Bereiche identifiziert werden: (1) leerer Lösungsraum, (2) kontinuierlicher Lösungsbereich und (3) Lösungsraum mit Diskontinuitäten (lokal leere Lösungsräume). Leere Lösungsräume lassen sich insbesondere auf physische kinematische Einschränkungen der Roboterachsen und/oder die Nichteinhaltung der erforderlichen Konstant-Werkzeugbahngeschwindigkeit während des Fräsens zurückführen. Der gezeigte Optimierungsraum mit stellenweisen Diskontinuitäten ist nicht durchgehend stetig und verdeutlicht die Notwendigkeit des Einsatzes von holistischen Optimierungsverfahren.

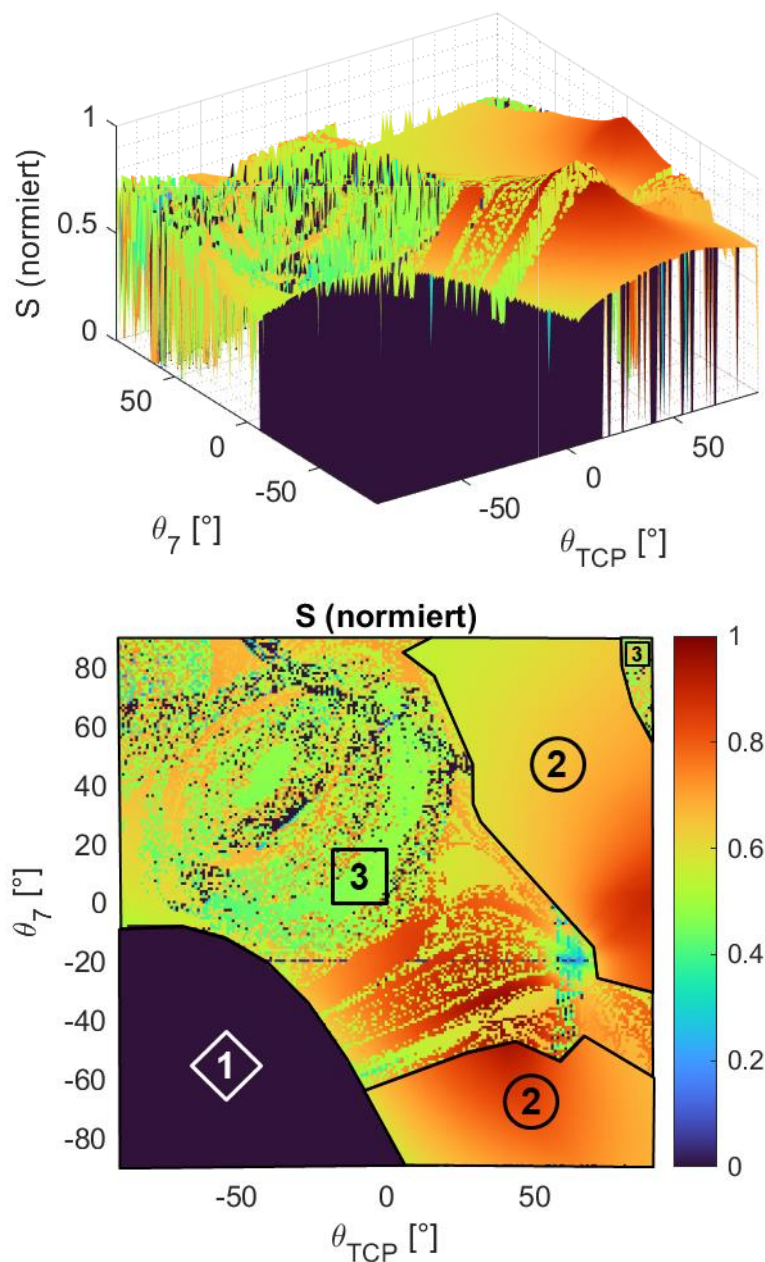


Abbildung 7–8: 2D-Optimierungsraum für fixe Busbar-Reihenfolge/Fräsrichtungen, (oben) Seitenansicht, (unten) Draufsicht mit Bereichen (1), (2), (3)

Nachfolgend wird auf direkte Suchmethoden, wie Grid Search (dt.: Rastersuche) und Pattern Search (dt.: Mustersuche), sowie auf evolutionäre Algorithmen, wie den genetischen Algorithmus, gesetzt. Direkte Suchmethoden können eine Bewertung der Zielfunktion ohne Vorliegen von Informationen über den Gradienten vornehmen. Evolutionäre Algorithmen nutzen Mechanismen der biologischen Evolution, wie Mutation, Selektion und Rekombination. Da die Zielfunktion nicht durchgehend stetig ist und stellenweise Diskontinuitäten aufweist, sind Gradienten-basierte Verfahren ungeeignet. Da das Optimierungsproblem nichtlinear ist, können lineare bzw. quadratische

Optimierungsverfahren ausgeschlossen werden. Grid Search ist ein Verfahren, bei dem der Lösungsraum umfassend und systematisch in verschiedenen Auflösungsstufen rasterförmig durchsucht wird. Pattern Search adaptiert das Suchmuster, basierend auf vorherigen Ergebnissen, und ist für die Anpassungsfähigkeit und Effizienz in komplexen Optimierungsräumen bekannt. Der genetische Algorithmus stellt den gängigsten evolutionären Algorithmus dar und wird insbesondere für die globale Suche in multidimensionalen Räumen eingesetzt. Für weiterführende Informationen wird auf (Hooke & Jeeves 1961), (Alibrahim & Ludwig 2021) und (Nocedal & Wright 2006) verwiesen.

Grid Search wird im Folgenden abgewandelt angewandt, indem dieses Verfahren hierarchisch ausgeführt wird. Das bedeutet, dass um einen ermittelten optimalen Punkt nochmals Grid Search mit einem eingegrenzten Suchbereich und einer kleineren Schrittweite durchgeführt wird. Dies wird bei Bedarf mehrfach wiederholt. Die hierarchische Ausführung dient der Beschleunigung dieser Suchmethode, indem um relevante Bereiche nacheinander feiner gerastert wird.

Die drei vorausgewählten Optimierungsverfahren werden im Folgenden hinsichtlich der Kriterien Optimierungsperformance S sowie -laufzeit t_{calc} bewertet und miteinander verglichen. Die Optimierungsperformance S ist ein Maß für die Nähe der ermittelten Lösung zum tatsächlichen Optimum nach der Optimierung, t_{calc} stellt hingegen die Dauer der Ausführung des Optimierungsalgorithmus dar. Beide Größen sind voneinander abhängig und stehen in einem Zielkonflikt. Eine höhere Performance ist mit längeren Laufzeiten verbunden. Generell sind eine höhere Optimierungsperformance und eine geringere Optimierungslaufzeit anzustreben. Die Hyperparameter sind in Tabelle 7-6 aufgelistet. Vor dem Vergleich der drei Verfahren wurden die Hyperparameter anhand von Erfahrungswerten voroptimiert. Ein Hyperparameter mit signifikantem Einfluss auf die beiden Bewertungskriterien ist jeweils offen und wird für den Vergleich variiert (grau markiert).

Die gemessene Optimierungsperformance S sowie -laufzeit t_{calc} jeweils für die drei Optimierungsverfahren unter Variation des offenen Hyperparameters sind in Abbildung 7–9 ersichtlich. Auf der Abszisse ist die Laufzeit t_{calc} reziprok abgebildet und logarithmisch dargestellt. Die Ordinate bildet S ab. Beide Achsen sind jeweils normiert, d. h. der höchste Wert ist jeweils 1.

Tabelle 7-6: Übersicht der Hyperparameter für die drei Optimierungsverfahren

Algorithmus	Startbereich	Wert/Bereich
Grid Search (hierarchisch)	Anzahl der Hierarchieebenen	3
	Skalierungsfaktor für Auflösung	4
	Auflösungsstufen	1 bis 16
Genetischer Algorithmus	Größe der Population	0.6
	Anfangsstärke der Mutation	0.05
	Abkühlungsrate der Mutation	0.8
	Größe des Turniers	10
	Kreuzungsrate	0.2
	Anzahl der Generationen	1 bis 15
Pattern Search	Maximale Anzahl der Iterationen	2000
	Maximale Anzahl der Funktionsbewertungen	4000
	Anfangsgröße des Suchnetzes	1
	Toleranzwert	9e-1 bis 1e-6

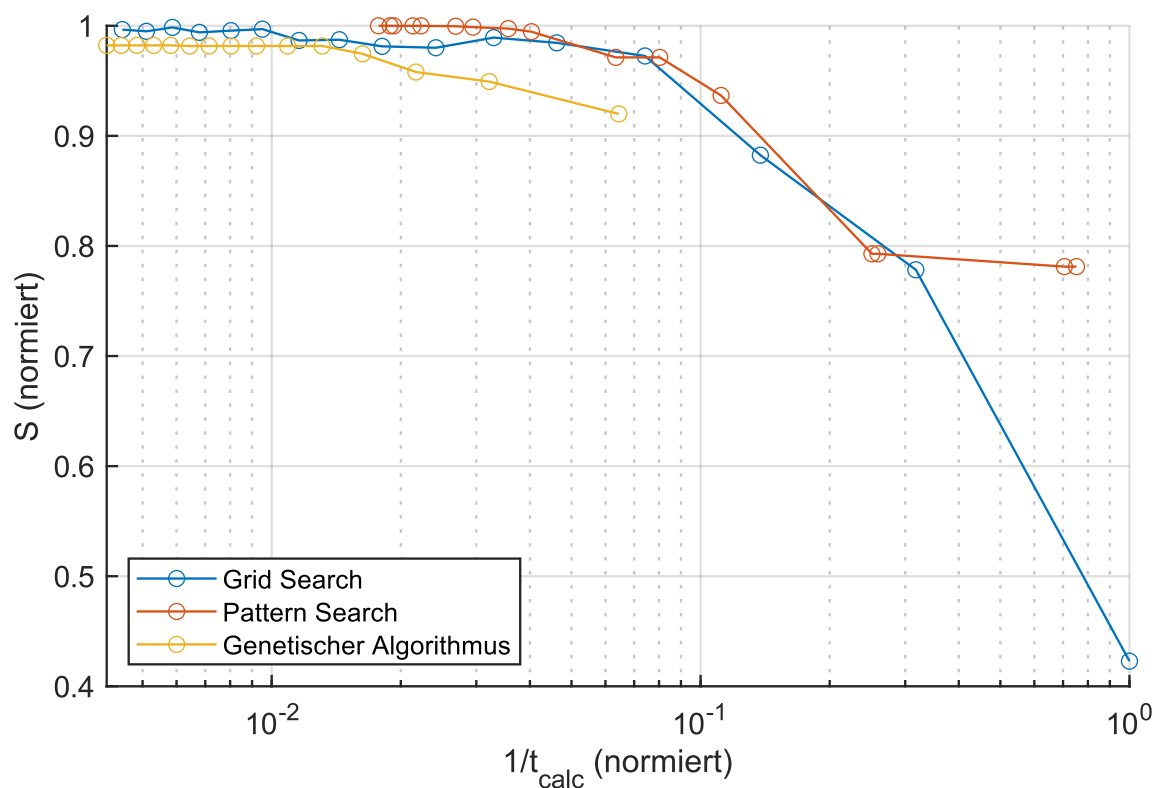


Abbildung 7–9: Gemessene Laufzeiten sowie Optimierungswerte für die drei Optimierungsverfahren

In der Abbildung ist jeweils für die drei Optimierungsverfahren eine Pareto-Front sichtbar. Der Verlauf der drei Pareto-Fronten weist einen ähnlichen Trend auf. In der Gesamtbetrachtung ist der genetische Algorithmus (GA) den anderen Verfahren durchgehend unterlegen. Weiterhin ist eine Mindestlaufzeit beim GA erforderlich, was als Nachteil angeführt werden kann. Bei sehr kurzen Laufzeiten können mit Pattern Search bessere Lösungen ermittelt werden. Bei mittleren und längeren Laufzeiten zeigen Pattern Search und Grid Search ein annähernd gleiches Leistungsprofil auf.

Fazit

Alle Algorithmen weisen ähnliche Leistungsprofile auf, jedoch mit unterschiedlichen Stärken in spezifischen Bereichen. Pattern Search ist bei sehr kurzen Laufzeiten aufgrund der höheren Performance zu bevorzugen. Bei mittleren und längeren Laufzeiten kann auf Pattern Search oder Grid Search wegen eines näherungsweise gleichen Leistungsprofils gesetzt werden. Aufgrund der durchgehend niedrigeren Performance des genetischen Algorithmus kann dieser grundlegend für das vorliegende Optimierungsproblem ausgeschlossen werden.

Ist eine zusätzliche visuelle Darstellung des zweidimensionalen Optimierungsraums erforderlich (vgl. Abbildung 7–8), wird der Einsatz von Grid Search (mit einem feinen Raster) angeraten. Hierdurch kann beispielsweise durch einen Benutzer überprüft werden, ob das ermittelte Optimum sich in der Nähe von Diskontinuitäten befindet (siehe Abbildung 7–8 (oben), Bereich (3)). Die Nähe zu Diskontinuitäten birgt die Gefahr, aufgrund von Systemungenauigkeiten in einen benachbarten Betriebspunkt zu gelangen, in welchem keine Lösung vorliegt. Nachfolgend wird daher zur Optimierung der Gesamtprozesszeit auf Grid Search gesetzt.

7.4 Gesamtsystemintegration

Die gesamte Verarbeitungspipeline mit einer Integration der Fräsbahnplanung (Kapitel 7.1), der kamerabasierten Punktlokalisierung (Kapitel 5.2) sowie der Trajektorienplanung einschließlich Optimierung (Kapitel 7.2, 7.3) ist in Abbildung 7–10 dargestellt. In der Abbildung sind außerdem die Übergabevariablen zwischen den einzelnen Schritten sowie die Schnittstelle zum Bediener inklusive Dateiformat (in Klammern) zu sehen.

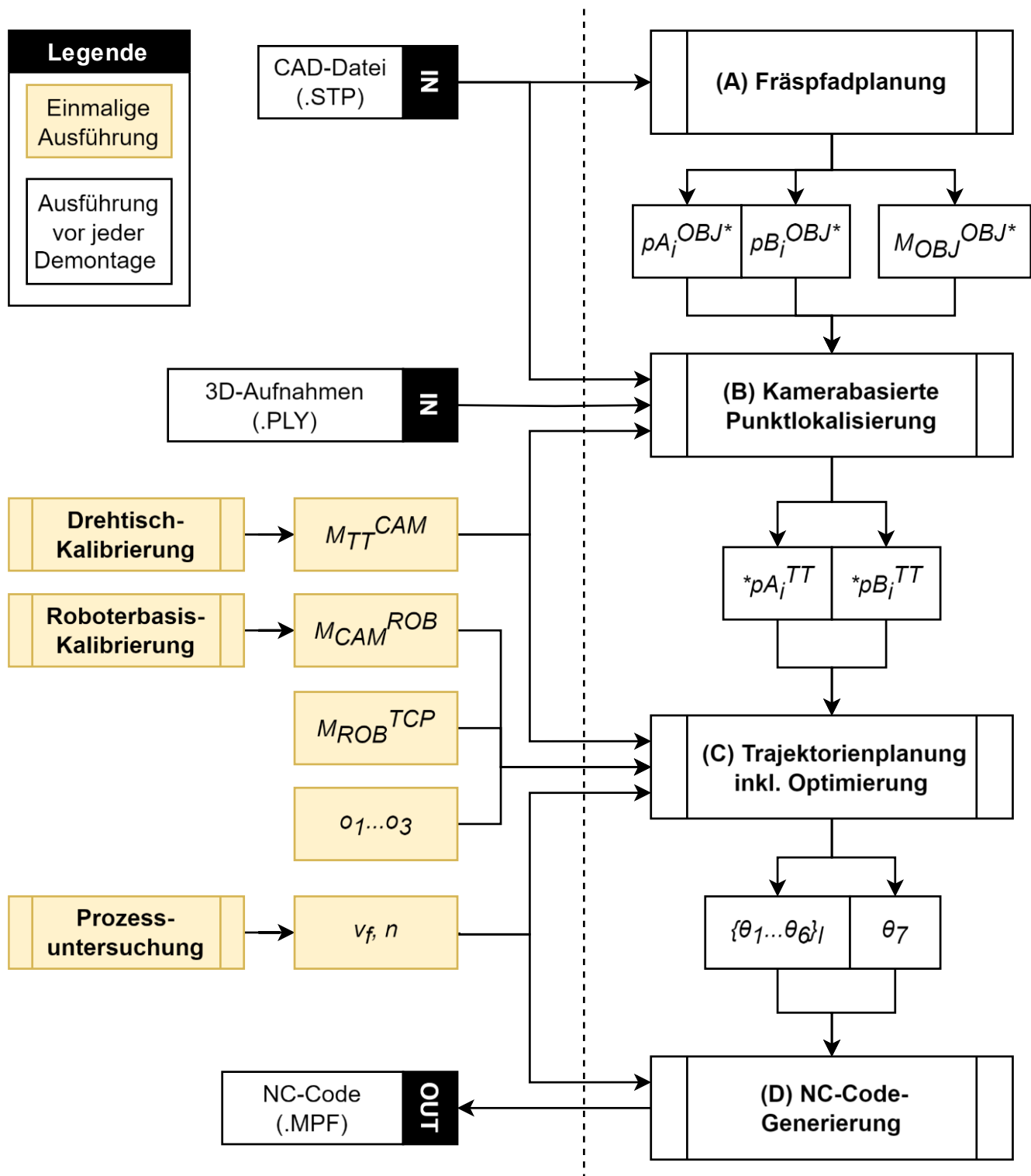


Abbildung 7–10: Integrierte Gesamtpipeline inklusive Übergabeparameter

Eine Beschreibung der einzelnen Übergabeparameter ist in Tabelle 7-7 zusammengefasst.

Tabelle 7-7: Darstellung der Übergabeparameter

Übergabe- parameter	Beschreibung	U	Z
pA_i^{OBJ*}	Startfräspunkt für i-te Busbar im angepassten Objekt-KOS	(A)	(B)
pB_i^{OBJ*}	Endfräspunkt für i-te Busbar im angepassten Objekt-KOS	(A)	(B)
M_{OBJ*}^{OBJ}	Transformationsmatrix vom Objekt-KOS zum angepassten Objekt-KOS	(A)	(B)
$*pA_i^{TT}$	Lokalisierter Startfräspunkt für i-te Busbar im Drehtisch-KOS	(B)	(C)
$*pB_i^{TT}$	Lokalisierter Endfräspunkt für i-te Busbar im Drehtisch-KOS	(B)	(C)
M_{CAM}^{TT}	Transformationsmatrix vom Drehtisch-KOS zum Kamera-KOS	(I)	(B), (C)
M_{ROB}^{CAM}	Transformationsmatrix vom Kamera-KOS zum Roboterbasis-KOS	(II)	(C)
M_{TCP}^{ROB}	Transformationsmatrix vom Roboterbasis-KOS zum Werkzeug-KOS	(II)	(C)
$o_1 \dots o_3$	Offsetparameter zur geometrischen Beschreibung des Fräsprozesses		(C)
v_f	Vorschubgeschwindigkeit		(C), (D)
n	Spindeldrehzahl		(C), (D)
$q_l = \{\theta_1 \dots \theta_6\}_l, \theta_7$	Liste an Achswinkelstellungen des Roboters für vorgegebene Positionen/Orientierungen sowie Achswinkelstellung des Drehtisches	(C)	(D)

U = Ursprung, Z = Ziel

Im ersten Schritt werden in der (A) Fräspfadplanung auf Basis des CAD-Modells die Start- und Endfräspunkte pA_i^{OBJ*} und pB_i^{OBJ*} der i-ten Busbar im angepassten Objekt-Koordinatensystem (KOS_{OBJ*}) extrahiert. Das Werkstück-Koordinatensystem wird gemäß der definierten Normung (vgl. Kapitel 7.1) angepasst, die Transformation erfolgt mittels M_{OBJ*}^{OBJ} . Alle drei Variablen werden zur (B) kamerabasierten Punktlokalisierung weitergegeben. Mithilfe von 3D-Aufnahmen des realen Batteriemoduls werden in diesem Schritt Start- und Endfräspunkte am realen, verformungsbehafteten Objekt lokalisiert. Die lokalisierten Fräspunkte $*pA_i^{TT}$ und $*pB_i^{TT}$ im Drehtisch-KOS (KOS_{TT}) sind die

Grundlage für die (C) optimierte Trajektorienplanung. Die beiden Schritte (B) und (C) setzen die Vorgabe der Transformationsmatrizen M_{CAM}^{TT} sowie M_{ROB}^{CAM} voraus, die sich aus der Kalibrierung des Drehtisches und der Roboterbasis ergeben. Weiterhin ist für (C) die Vorgabe von M_{TCP}^{ROB} sowie der drei Offsetparameter zur geometrischen Beschreibung des Fräsprozesses erforderlich. Die Transformationsmatrix M_{TCP}^{ROB} stellt die Beziehung zwischen der Roboterbasis und der Werkzeugspitze her und ist durch die Konstruktionszeichnung des Roboters sowie der Frässpindel gegeben. Die Offsetparameter $o_1 \dots o_3$, die den Eintauchabstand, die Eintauchtiefe sowie die Rückzugshöhe beim Fräsen beschreiben, sind Erfahrungswerte und müssen manuell vorgegeben werden. Für die Optimierung bei der Trajektorienplanung muss zusätzlich die Vorgabe der Vorschubgeschwindigkeit beim Fräsen erfolgen. Die (C) Trajektorienplanung setzt außerdem die Kenntnis des Normalenvektors ${}^*n_i^{OBJ*}$ der lokalisierten Punkte ${}^*pA_i^{OBJ*}$ bzw. ${}^*pB_i^{OBJ*}$ voraus. Der Normalenvektor ${}^*n_i^{OBJ*}$ ist gegeben durch

$${}^*n_i^{OBJ*} = e_z^{OBJ*} \times \frac{{}^*pB_i^{OBJ*} - {}^*pA_i^{OBJ*}}{\| {}^*pB_i^{OBJ*} - {}^*pA_i^{OBJ*} \|} \quad 7-6$$

mit e_z^{OBJ*} für den z-Achsenvektor im angepassten Objekt-KOS.

Das Ergebnis der (C) optimierten Trajektorienplanung stellt eine Liste an Achswinkelstellungen des Roboters $q_l = \{\theta_1 \dots \theta_6\}_l$ für jede Position inklusive Orientierung x_l^{ROB} im Roboterbasis-KOS sowie die optimale Achswinkelstellung des Drehtisches θ_7 dar. Neben diesen Parametern müssen für die (D) Steuerungscodegenerierung die prozessbezogenen Parameter Vorschubgeschwindigkeit v_f sowie Spindeldrehzahl n , welche aus den systematischen Prozessuntersuchungen resultieren, vorgegeben werden.

Es liegt eine integrierte, digitale Verarbeitungskette vor, die nach dem Einrichten (Kalibrierung, Prozessuntersuchung) auf Basis des CAD-Modells sowie von 3D-Kameraaufnahmen automatisiert einen Steuerungscode für das Trennen der Zellkontaktierungen mittels Fräsen in der vorgegebenen flexiblen Demontage erzeugen kann. Die Validierung des integrierten Gesamtsystems wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

8 Validierung des flexiblen Trennens

In diesem Kapitel wird die Validierung des integrierten Gesamtsystems zum flexiblen Trennen der Zellkontaktierungen dargelegt. Im Speziellen sollen die Funktionsfähigkeit der entwickelten Gesamtpipeline, die Erfassung der Verformung und Kompensation sowie die Flexibilität demonstriert werden. Nachfolgend wird auf den Prüfstands Aufbau inklusive des entwickelten Dummy-Batteriemoduls näher eingegangen.

8.1 Prüfstands Aufbau

Abbildung 8–1 zeigt den Ausschnitt der implementierten Roboteranlage, welche als Prüfstand zur Validierung dient. Eine detaillierte Beschreibung der Roboterzelle sowie der einzelnen Subsysteme sind in Kapitel 4.4 zu finden.

Als Steuerung für den Roboter, das Spannsystem als Drehtisch sowie die Spindel kommt die Computerized Numerical Control (CNC)-Steuerung SINUMERIK One zum Einsatz, welche üblicherweise in Werkzeugmaschinen Anwendung findet. Die Steuerung arbeitet den generierten NC-Code ab und übersetzt diesen in eine Roboterbewegung. Gleichzeitig werden Peripherie (Pneumatik für Werkzeugeinspannung) und Prozessparameter (Spindeldrehzahl) über sogenannte M-Befehle angesteuert.

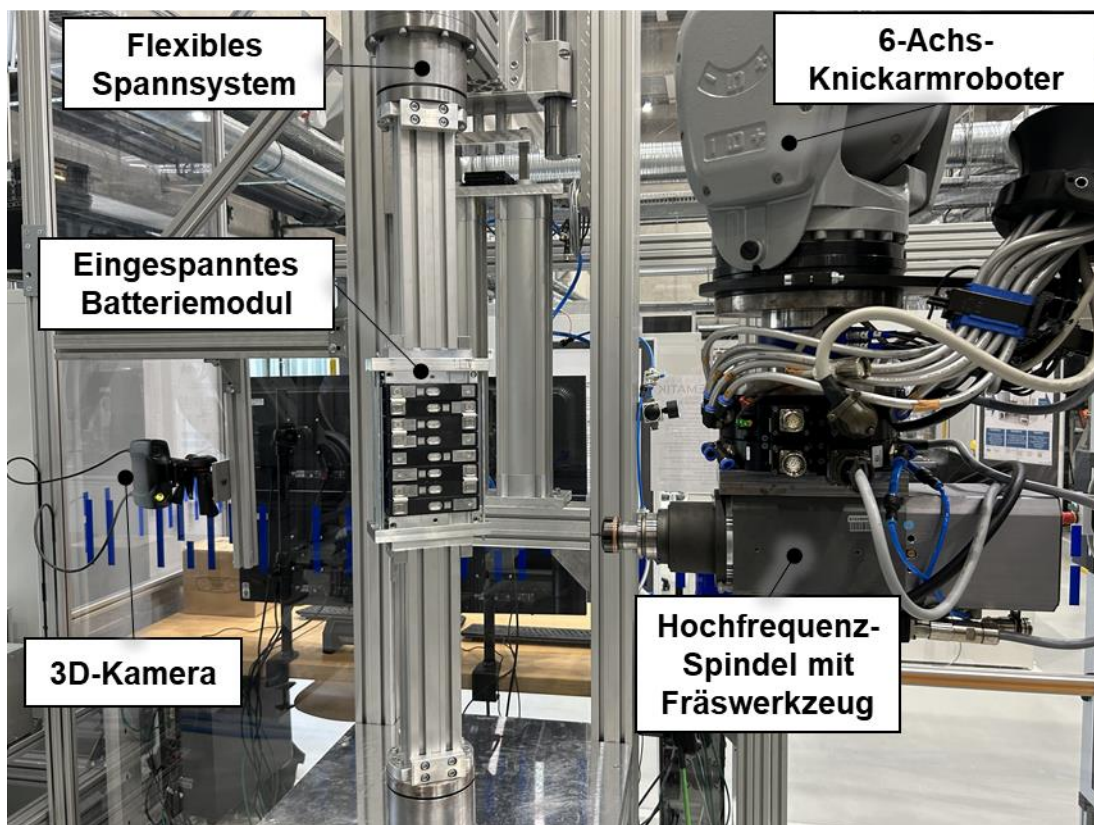


Abbildung 8–1: Implementierte Roboterzelle als Validierungsprüfstand

Das Dummy-Batterieminodul, welches bei der Validierung eingesetzt wird, ist in Abbildung 8–2 zu sehen. Es wurde so konzipiert, dass es die äußere Geometrie und Anordnung eines realen Batteriminoduls mit prismatischen Zellen, welche aus Hardcase bestehen, präzise abbildet. Statt Lithium-Ionen-Zellen mit aktivem Zellmaterial kommen Dummy-Zellen aus Aluminium-Vollmaterial zum Einsatz. Die Abmessungen der Dummy-Zellen sowie die Geometrie und das Material der Busbars entsprechen nahezu der Realität. Dies gewährleistet, dass die geometrischen Anforderungen an die Validierung der entwickelten Pipeline erfüllt werden, während die Sicherheit bei der Erprobung gewährleistet bleibt.

Der Einsatz realer Batteriminodule hätte umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen erfordert, da von Lithium-Ionen-Zellen elektrische, mechanische, chemische und thermische Gefahren ausgehen (vgl. Kapitel 4.1.5). Da die Sicherheitsvorkehrungen der aufgebauten Demontageanlage zum Zeitpunkt der Vollendung dieser Arbeit für diesen Zweck nicht ausreichend waren, wurde stattdessen mit Dummy-Batterieminodulen gearbeitet, um dennoch die Erprobung unter sicheren Bedingungen zu gewährleisten.

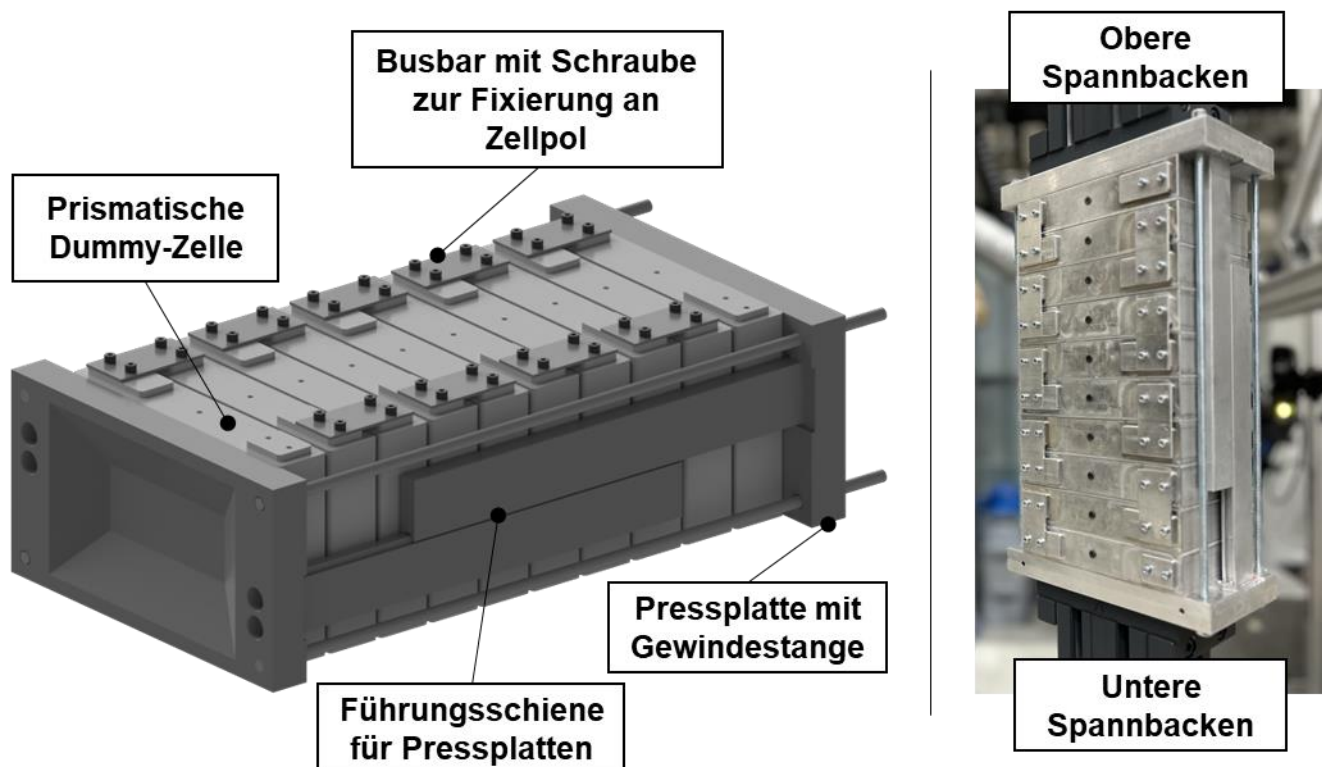


Abbildung 8–2: (links) Konstruktiver Aufbau des Dummy-Batterieminoduls, (rechts) eingespanntes Modul im Spannsystem

Die Konstruktion besteht aus gestapelten Zellen, welche durch zwei Pressplatten sowie Gewindestangen verspannt werden. Die Pressplatten sind mithilfe von

Führungsschienen zueinander ausgerichtet. Zwischen den Zellen können Abstandsbleche definierter Dicke platziert werden, welche die Verformung bzw. Stapeldickenänderung simulieren. Standardmäßig ist sowohl im CAD-Modell als auch im realen Objekt ein 2 mm dickes Abstandsblech zwischen zwei Zellen vorhanden. Zusätzlich lassen sich 1 mm oder 2 mm starke Abstandsbleche einsetzen, um die in Kapitel 4.1.4 abgeschätzte geometrische Varianz von $\sim 7,5\%$ in Stapelrichtung zu berücksichtigen. Außerdem zielt die Konstruktion auf einen schnellen Wechsel der Busbars ab, die mittels Schraubverbindung an den Zellpolen der einzelnen Zellen fixiert sind. Für einen Längsausgleich beim Einsatz verschiedener Abstandsbleche sind die Bohrungen an den Busbars als Langlöcher ausgeführt. Die beiden Spannbacken des Spannsystems weisen einen Pyramidenstumpf auf, die in die Mulde der Pressplatten greifen (vgl. Abbildung 8–2 links) und der Zentrierung dienen. Diese komplementäre Gestaltung stellt mittels Form-Kraftschluss die Fixierung des Batteriemoduls im Spannsystem sicher. Zum Aufzeigen der Flexibilität kann die Anzahl der eingesetzten Dummy-Zellen von 8 bis 12 variiert werden. Die technischen Spezifikationen der Nachbildung sind in Tabelle 8-1 zusammengefasst. Die geometrischen Angaben zu den Dummy-Zellen sind angelehnt an die prismatische Zelle CATL NMC 48Ah 3,7V (siehe Anhang 11.7).

Der Aufbau des entwickelten Dummy-Batteriemoduls bietet den großen Vorteil, dass mit minimalem Aufwand unterschiedliche Zellanzahlen getestet werden können, ohne dass eine Neukonstruktion oder die Fertigung mehrerer Module erforderlich ist. Zudem können nach einem zerstörenden Versuch die Busbars innerhalb kurzer Zeit ausgetauscht und neue Busbar-Varianten erprobt werden.

Tabelle 8-1: Technische Spezifikation des Dummy-Batteriemoduls

Bezeichnung	Werte
Anzahl Zellen	8; 10
Anzahl Reihen	1
Verschaltungstopologie	8s1p, 10s1p
Zelldicke, -tiefe, -höhe [mm]	28 x 150 x 100
Zellpoltiefe p_{t+} / p_{t-} [mm]	40 / 25
Zellpoldicke p_{b+} / p_{b-} [mm]	20 / 20
Zellpolhöhe p_h [mm]	3
Zellpolabstand p_a [mm]	115
Dicke der Abstandsbleche [mm]	2; 3; 4
Busbar-Gesamtbreite b_b / -länge b_l [mm]	25 / 50

8.2 Validierungsergebnisse

Innerhalb des Kapitels werden die Validierungsergebnisse in Bezug zum Gesamtsystem sowie zur Verarbeitungspipeline vorgestellt. Zunächst wird auf Ergebnisse zur Quantifizierung der Gesamtsystemgenauigkeit eingegangen und bewertet, ob die Genauigkeit für den vorliegenden Anwendungsfall ausreichend ist. Weiterhin wird die Flexibilität der Pipeline aufgezeigt sowie die Prozessstabilität am Gesamtsystem (Roboter mit Spindel sowie Spannsystem) demonstriert. Zu guter Letzt werden die Möglichkeiten zum Optimieren der Gesamtdauer beim Trennen der Zellkontaktierungen evaluiert.

Als Validierungsobjekt kommt das Dummy-Batteriemodul mit variabler Zellanzahl sowie austauschbaren Abstandsblechen zur Dickenverstellung und mit flachen Busbars definierter Geometrie zum Einsatz. Das Dummy-Batteriemodul ist während der Validierungsversuche im Spannsystem eingespannt. Nach jeder physischen Manipulation an der 3D-Kamera findet eine vollständige Kalibrieroutine für den Drehtisch und die Roboterbasis mithilfe des Ansatzes aus Kapitel 5.1 statt. Die mittlere Kalibrierengenauigkeit bei der Spannsystem-Drehachse beträgt 0,032 mm ($\pm 0,011$ mm) und beim Roboter 0,33 mm ($\pm 0,15$ mm). Für jeden Versuch wird die integrierte Pipeline aus Kapitel 7.4 inklusive der kamerabasierten Punktlokalisierung und anschließender Codegenerierung vollständig durchlaufen. Bei allen Versuchen wird jeweils eine Wertekombination für θ_7 und θ_{TCP} gewählt und während eines Versuchsdurchlaufs konstant gehalten.

8.2.1 Kompensation geometrischer Verformungen

Innerhalb dieses Kapitels wird die zunehmende Bahnabweichung aufgrund der Dickenzunahme des Batteriemoduls in Stapelrichtung ohne kamerabasierte Verformungserfassung nachgewiesen. Zugleich soll die Funktionsweise der kamerabasierte Punktlokalisierung zur Kompensation der Dickenänderung demonstriert werden. Dies erfolgt jeweils mittels Quantifizierung der Systemgenauigkeit anhand der Bahnabweichung. Die Bahnabweichung e_b wird, wie in Abbildung 8–3 dargestellt, als Abstand in z-Richtung (KOS_{OBJ}) zwischen dem Mittelpunkt der tatsächlichen Fräsbahn und der Mittellinie der idealen Bahn definiert (vgl. Kapitel 4.2.3). Als ideale Bahn wird die Mitte zwischen zwei Zellmitten angenommen.

Ein erfolgreicher Frässchnitt ist charakterisiert durch ein vollständiges Trennen der physischen Verbindung zwischen den beiden Zellpolen, ohne in Berührung mit den Zellpolen zu kommen. Somit muss die Bahnabweichung kleiner sein als die Hälfte der

Differenz zwischen der Brückenlänge b_{l2} und dem Fräserdurchmesser d_w . Im dargestellten Fall ($b_{l2} = 10 \text{ mm}$ sowie $d_w = 8 \text{ mm}$) beträgt die geforderte maximale Bahnabweichung $e_{b,max} = 1 \text{ mm}$.

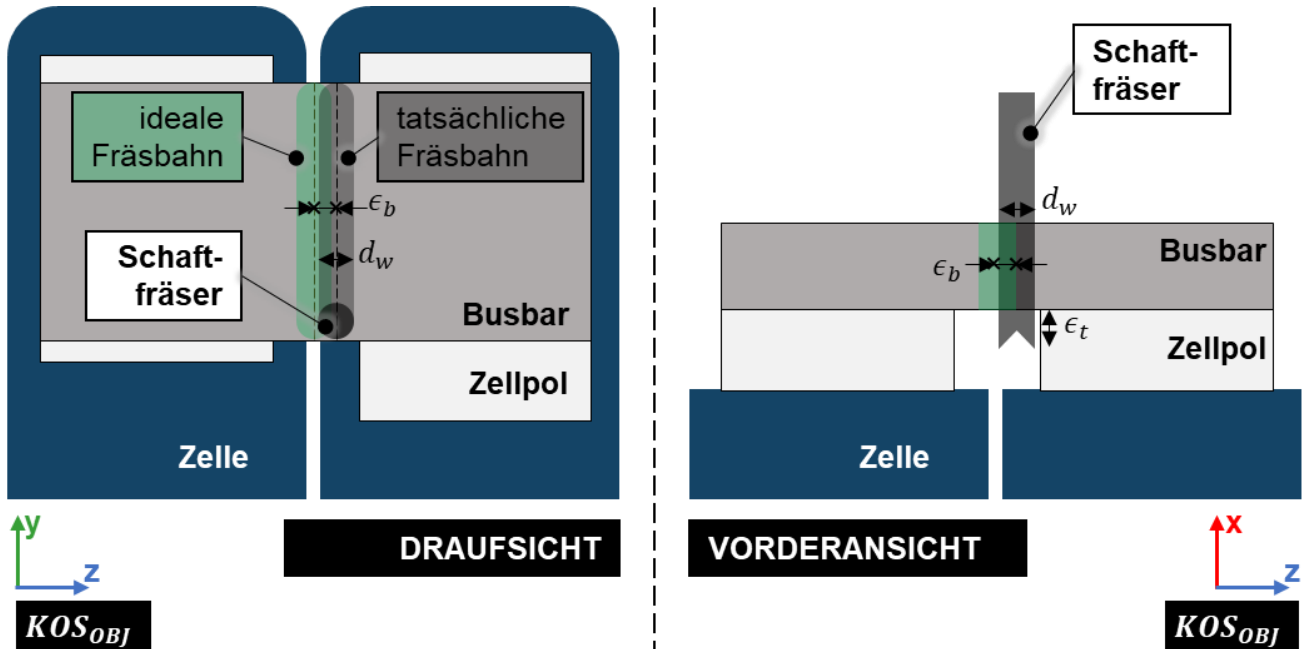


Abbildung 8-3: Bahnabweichung beim Trennen der Zellkontaktierung

Genauigkeiten in x- sowie y-Richtung (KOS_{OBJ}) werden nachfolgend nicht weiterverfolgt, da in diesen Richtungen höhere Abweichungen toleriert werden können (z. B. in x-Richtung aufgrund der Zellpolhöhe). Zudem wird angenommen, dass die Systemgenauigkeit in allen drei Raumrichtungen im lokalen Bereich näherungsweise gleich ist (isotrop).

Bei diesem Validierungsversuch wird nach Ausführung der gesamten Pipeline die Fräsbahn mit einem rotierenden, schwarzen Lackstift markiert (vgl. Abbildung 8-4), ein Fräser kommt hierbei nicht zum Einsatz. Im Nachgang jedes Versuches wird die Bahnabweichung (Abstand der Markerlinie zu den Befestigungsschrauben an der Busbar) ermittelt. Dabei werden mithilfe eines Auswerteskriptes auf der Basis von Fotoaufnahmen die Positionen der Markerlinien sowie der Indexpunkte (mittig auf den Dummyzellen) ermittelt und die jeweiligen Bahnabweichungen berechnet. Für die Markierungsversuche wird der Versuchsplan aus Tabelle 8-2 zugrunde gelegt. Zur Demonstration des Atmungseffektes und der zunehmenden Bahnabweichung wird beim Versuch B3* (3 mm Blech) der generierte Steuerungscode aus Versuch B1 (2 mm Blech) eingesetzt. Bei allen Versuchen berührt die Markerspitze die Busbars nacheinander ($c_o = [1 \ 2 \ 3 \ \dots]$) von links nach rechts ($c_d = [0 \ 0 \ 0 \ \dots]$).



Abbildung 8–4: Versuchsdurchführung mit schwarzem Lackstift für die Markierung der Frässhritte

Tabelle 8-2: Versuchsplan für die Markierungsversuche

Versuch	Blechdicke [mm]	Zellanzahl	θ_{TCP} [°]	θ_7 [°]
B1	2	8	0	90
B3*	3	8	0	90
B4	3	8	0	90
B5	4	8	0	90

* Statt der Ausführung der kompletten Pipeline kam bei B3* der NC-Code von B1 zum Einsatz.

In Abbildung 8–5 sind jeweils Aufnahmen des Dummy-Batteriemoduls nach einem Markierungsversuch zu sehen. Links wird das Ergebnis aus der Versuchsreihe B1 gezeigt, in der näherungsweise die ideale Fräsbahn getroffen wurde. In der rechten Aufnahme (Ergebnis aus Versuchsreihe B3*) ist klar die zunehmende Bahnabweichung an der fortlaufenden Busbarnummer $i_{busbar} = 1 \dots 7$ ersichtlich. Bei B3 (mit 3 mm Zwischenblech) wurde der Steuerungscode von B1 (mit 2 mm Zwischenblech) ausgeführt, was zum klaren Verfehlen der idealen Bahn führt. Die Notwendigkeit einer sensorbasierten Geometrieerfassung wird hierbei nochmals deutlich.

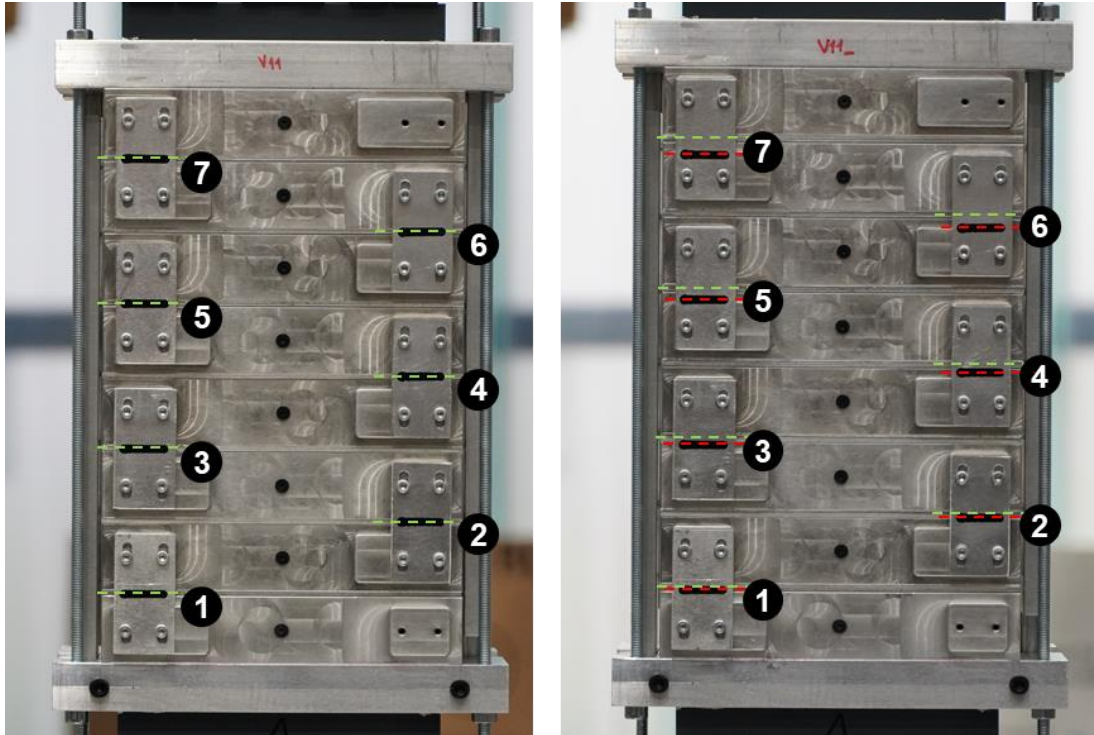


Abbildung 8-5: Dummy-Batterieminodul nach dem Markierungsversuch: (links) B1, (rechts) B3*

Abbildung 8-6 illustriert für die Versuche B1, B3* und B4 jeweils die Bahnabweichungen ϵ_b für die Busbarnummer $i_{busbar} = 1 \dots 7$.

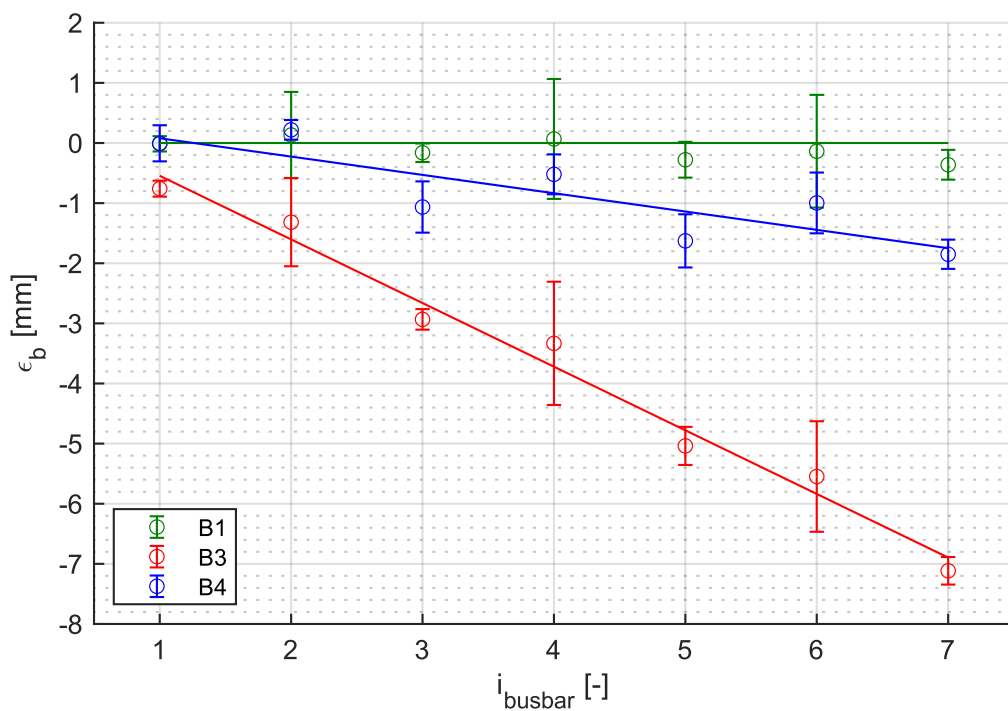


Abbildung 8-6: Bahnabweichungen (Mittelwert und Standardabweichung) bei verschiedenen Markierungsversuchen in Abhängigkeit des Busbarindex

Bei B1 (2 mm Blech im CAD-Modell sowie im realen Batteriemodul) wurde die Fräsbahn mit einer Genauigkeit von ± 1 mm getroffen, was im vorliegenden Fall als ausreichend einzustufen ist. Bei B3* (mit 3 mm Blech, Steuerungscode von B1) ist klar die bereits beschriebene, zunehmende Bahnabweichung ersichtlich (vgl. rote Linie gegenüber grüner Linie). Bei B4 (3 mm Blech im realen Batteriemodul, 2 mm Blech im CAD-Modell; mit kamerabasierter Verformungserfassung) ist eine deutliche Abnahme der Bahnabweichung gegenüber B3* zu verzeichnen, was auf die Funktionsfähigkeit der kamerabasierten Verformungserfassung zurückzuführen ist.

Dennoch sind bei der Zunahme der geometrischen Abweichungen des realen Objekts gegenüber dem CAD-Modell höhere Varianzen bei den Bahnabweichungen zu verzeichnen (vgl. Abbildung 8–7).

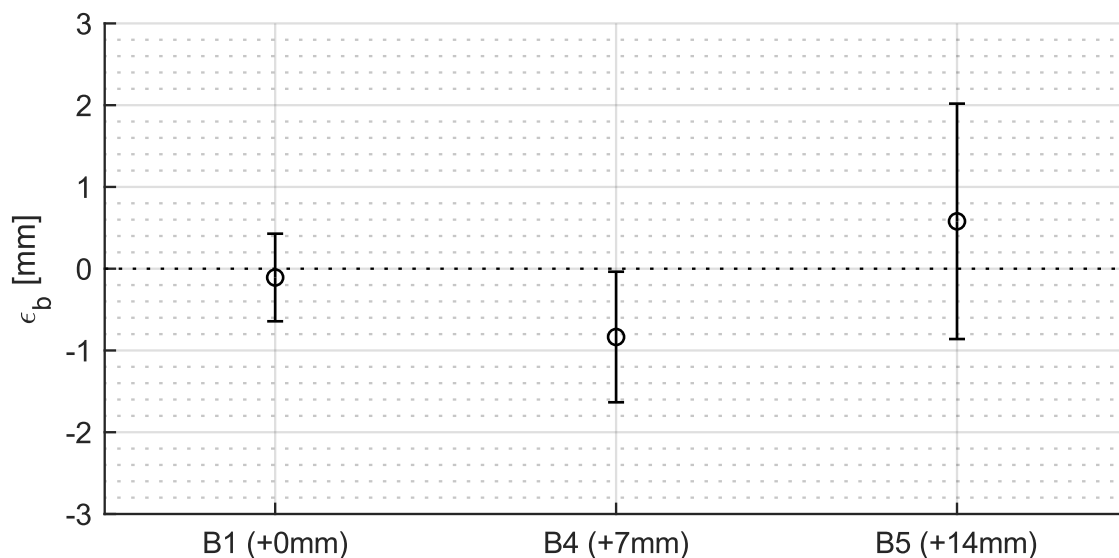


Abbildung 8–7: Bahnabweichungen (Mittelwert und Standardabweichung) mit kamerabasierter Verformungskompensation bei induzierter, gesamter Moduldickenänderung von (links) +0 mm, (Mitte) +7 mm, (rechts) +14 mm

8.2.2 Prozesssicherheit und Produktflexibilität

Im Folgenden soll die Machbarkeit eines stabilen und erfolgreichen Fräsprozesses in der flexiblen Demontageanlage (Roboter mit Spindel sowie Spannsystem) aufgezeigt werden. Zugleich sollen der hohe Automatisierungsgrad der Pipeline sowie die Produktflexibilität demonstriert werden. Ein hoher Automatisierungsgrad bei gleichzeitiger Flexibilität bedeutet, dass für zwei verschiedene Batteriemodule, die sich durch die Zellanzahl (8 und 10 Stück) unterscheiden, der Steuerungscode, ausgehend von der CAD-

Datei und von 3D-Aufnahmen, automatisiert möglichst ohne Benutzerinteraktion erzeugt wird.

Für die Demonstration wird für das gezeigte Dummymodul mit jeweils acht und zehn Zellen die Pipeline (ohne Optimierung der Achsenstellungen) vollständig durchlaufen. Die Versuche gelten als erfolgreich, wenn bei der Pipeline keine Fehler auftreten sowie die Zellkontaktierung ohne Beschädigung der benachbarten Komponenten (in diesem Fall Zellpole oder Zellen) vollständig durch den Fräsprozess getrennt wird. Die Trennversuche werden mit Werkzeugdurchmesser $d_w = 8 \text{ mm}$, Schnittgeschwindigkeit $v_c = 400 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ sowie Zahnvorschub $f_z = 0,05 \text{ mm}$ durchgeführt. Die Prozessbewertung findet durch eine visuelle Begutachtung des Trennschnitts statt.

Bei der Versuchsdurchführung wurde die Pipeline ohne Fehler und vollautomatisiert durchlaufen, d. h., alle Schritte in der Verarbeitungskette sind korrekt ausgeführt. Durch den Benutzer ist lediglich die Vorgabe des CAD-Modells im STEP-Format sowie die Angabe über die Zellanzahl erforderlich. Das Ergebnis der Trennschnitte ist in Abbildung 8–9 sowie Abbildung 8–10 dargestellt. Die roten Linien auf den Busbars dienen vor allem der Identifizierung der einzelnen Busbarstücke nach ihrer Entfernung vom Batteriemodul. Eine erfolgreiche Trennung zeigt sich an durchtrennten roten Linien und Schnittkanten an den Busbars ohne Wirrspäne. Ein Beispiel für Wirrspanbildung an den Schnittkanten ist in Abbildung 6–16 zu sehen. Der Trennvorgang selbst ist in den Momentaufnahmen in Abbildung 8–11, Abbildung 8–12 sowie Abbildung 8–13 festgehalten.

Wie auf den Bildern klar erkennbar ist, sind die Frässchnitte auf allen Busbars erfolgreich verlaufen. An den Fräskanten ist ein sauberer Schnitt ohne Bildung von Rückständen deutlich zu erkennen, was auf einen stabilen Prozess hindeutet. Auch weisen die entstehenden Wendelspanstücke (vgl. Abbildung 8–8), wie bereits in Kapitel 6.1.3 untersucht, auf eine stabile Prozessdurchführung hin. Der höchste Wert für die kritische Spanlänge beträgt beim Versuch $\max(l_{krit}) = 6,00 \text{ mm}$ und ist somit erwartungsgemäß kleiner als $l_{krit,max} = 6,4 \text{ mm}$. Das Überlappen von zwei oder mehr Spänen wird in dieser Arbeit ausgeschlossen, wie dies bereits in Kapitel 6.2 anfangs näher diskutiert wurde. Dass der Einfluss der Strukturnachgiebigkeit des Roboters auf die Bahnabweichung beim Fräsen der Busbars tatsächlich vernachlässigbar ist, zeigt sich in den resultierenden, geraden Fräsbahnen. Die maximale Bahnabweichung $e_{b,max}$ wurde nicht überschritten.

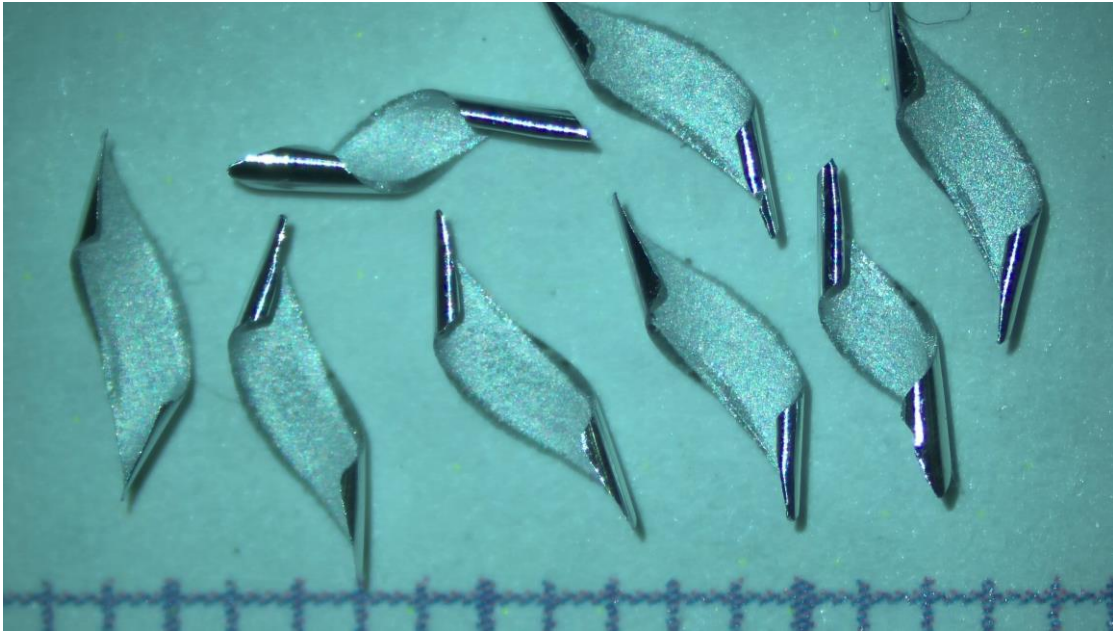


Abbildung 8–8: Wendelspanstücke aus dem Validierungsversuch mit Millimeter-Messskala als Maßstab



Abbildung 8–9: Erfolgreiche Trennschnitte beim Dummy-Batteriemodul mit acht Zellen (vorher und nachher)



Abbildung 8–10: Erfolgreiche Trennschnitte beim Dummy-Batteriemodul mit zehn Zellen (vorher und nachher)

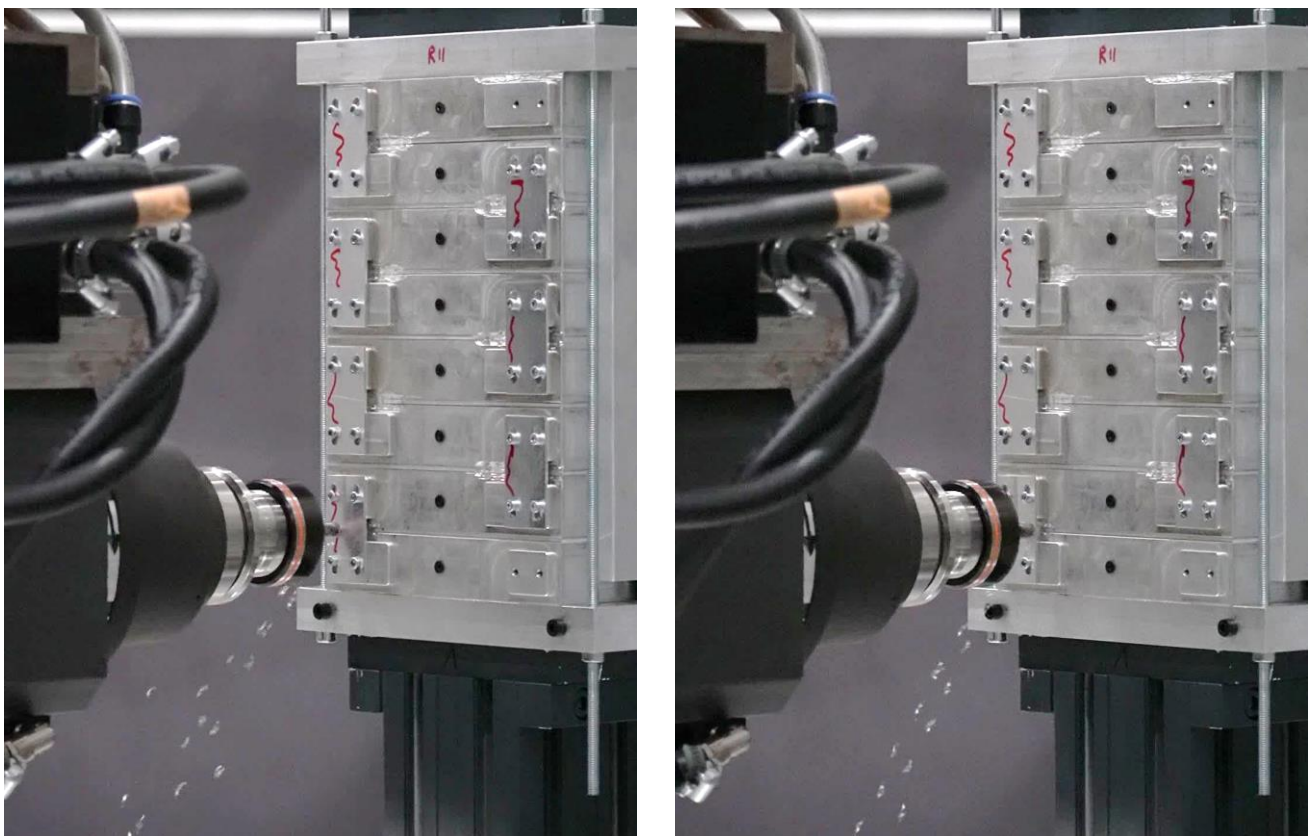


Abbildung 8–11: Fräsen der 1. Zellkontaktierung

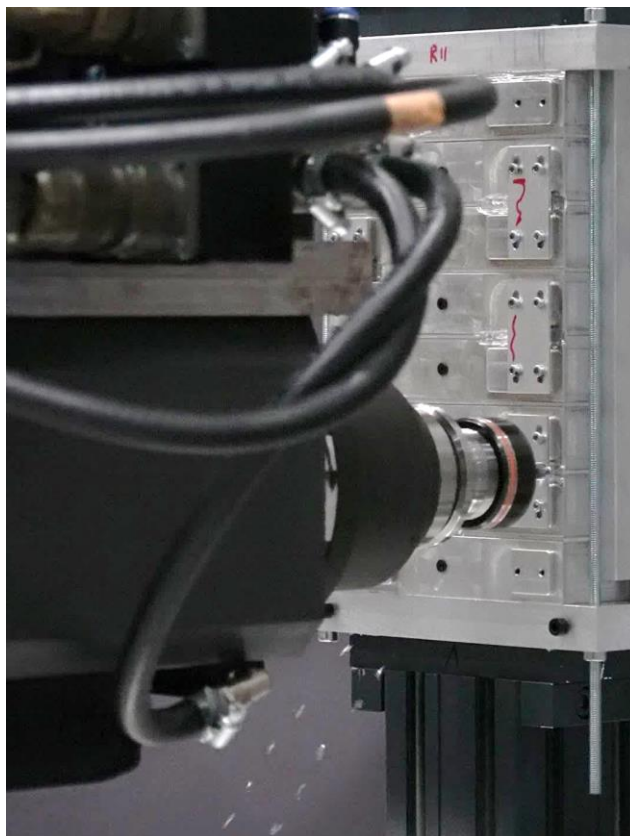


Abbildung 8–12: Fräsen der 2. Zellkontaktierung



Abbildung 8–13: Fräsen der letzten Zellkontaktierung

8.2.3 Zeitersparnis durch globale Optimierung

Wie bereits in Kapitel 7.3 dargelegt, liegt beim vorliegenden System ein unendlicher Lösungsraum in Bezug zur Drehtischwinkelstellung θ_7 , Spindelorientierung θ_{TCP} und zu Fräsrichtungen sowie zur Reihenfolge der Zellkontaktierungen vor. Für eine nähere Beschreibung der genannten Parameter wird auf Kapitel 6.3.1 sowie Kapitel 7.3.2 verwiesen. Dabei sei nochmals erwähnt, dass die Spindelachse stets senkrecht zur Bearbeitungsoberfläche steht. Darüber hinaus wird in Kapitel 7.3.3 gezeigt, dass sich Grid Search als Optimierungsverfahren eignet und nachfolgend zur Anwendung kommt. Insbesondere soll innerhalb des vorliegenden Kapitels quantitativ die Reduzierung der Gesamtdauer aller Trennoperationen durch die Ermittlung einer optimalen Lösung für die offenen Parameter mittels Grid Search exemplarisch demonstriert werden.

Für das exemplarische Aufzeigen der Reduzierung der Gesamtdauer wird die Pipeline vollständig für das Dummy-Batteriemodul mit jeweils acht (D1, D2*) sowie zehn Zellen (D3, D4*) durchlaufen. Der Pipeline-Durchlauf findet jeweils einmal ohne Optimierung (D1, D3) sowie einmal mit Optimierung (D2*, D4*) statt. Zur vereinfachten Versuchsdurchführung erfolgen die Versuche ohne Werkzeug. Bei der Messung der tatsächlichen Gesamtdauer wird die Zeit zwischen Bewegungsstart und -ende des Roboters gemessen. Die vier Parameter bei D1 und D3 stellen eine initial gewählte Parameterkombination dar. Die Erreichbarkeit und die Sicherstellung der Vorschubgeschwindigkeit beim Fräsen sowie die Kollisionsfreiheit sind hierbei gewährleistet.

Die Versuchsergebnisse zur Optimierung der Gesamtdauer sind in Abbildung 8–14 illustriert. Weiterhin sind die Ergebnisse sowie die Randbedingungen der Versuche in Tabelle 8-3 zusammengefasst. Der Index für eine der acht voroptimierten optimalen Kombinationen aus Busbar-Reihenfolge c_o sowie Fräsrichtungen c_d (vgl. Kapitel 7.3.2) wird nachfolgend als od-Index (o=order, d=direction) bezeichnet. Die Angabe od-Index = (0) stellt die einfachste Variante dar, in der die Busbars nacheinander ($c_o^{(0)} = [1\ 2\ 3\ \dots]$) jeweils von links nach rechts ($c_d = [0\ 0\ 0\ \dots]$) gefräst werden.

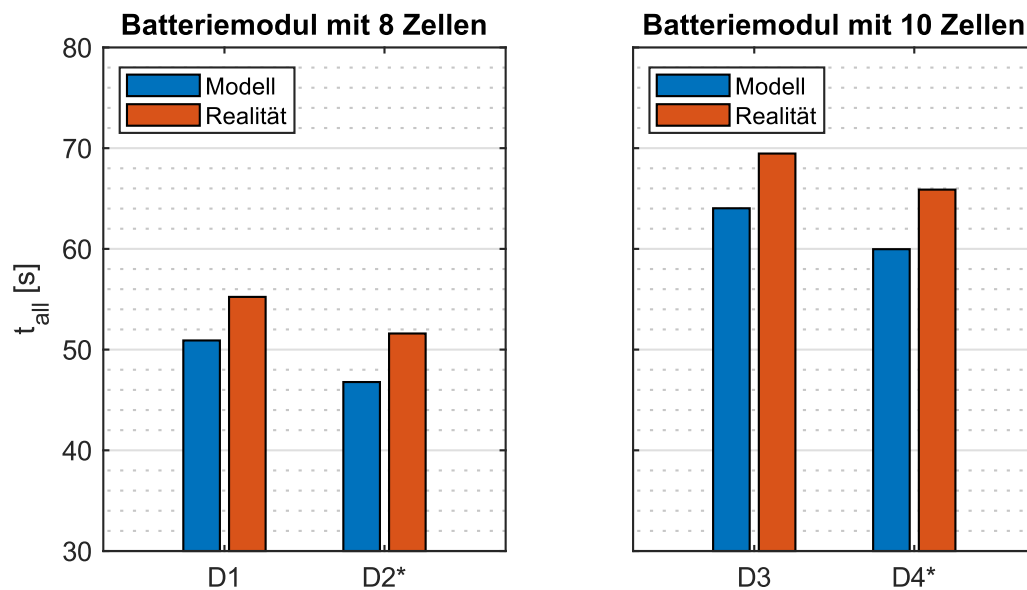


Abbildung 8–14: Simulierte und gemessene Gesamtdauern bei nicht-optimierten und optimierten Parameterkombinationen

Tabelle 8-3: Simulierte und gemessene Gesamtdauern bei nicht-optimierten und optimierten Parameterkombinationen

Versuchsreihe	Anzahl Zellen	θ_{TCP} [°]	θ_7 [°]	od-Index	Zeit Modell [s]	Zeit Realität* [s]
D1	8	0	90	(0)	50,91	55,23 ($\pm 0,00$)
D2*	8	15	0	(2)	46,78	51,60 ($\pm 0,03$)
D3	10	0	90	(0)	64,03	69,47 ($\pm 0,03$)
D4*	10	15	0	(2)	59,97	65,88 ($\pm 0,01$)

*Durchschnitt sowie Standardabweichung der Messwerte

In den Ergebnissen ist eine relative Diskrepanz zwischen Realität und Modell in einem Bereich von 10 % zu beobachten. Der Grund hierfür liegt darin, dass aus Effizienzgründen für den Optimierer ein vereinfachtes Modell mit konstantem Geschwindigkeitsprofil verwendet wurde, wobei Beschleunigungen und Ruck vernachlässigt wurden. Da der Unterschied zwischen Realität und Modell näherungsweise konstant ist, erscheinen die genannten Vereinfachungen für die Zeitoptimierung vertretbar.

Durch Anwendung von Grid Search konnte beispielhaft eine Reduktion der Gesamtdauer für das Trennen aller Zellkontaktierungen beim Batteriemodul jeweils mit acht und zehn Zellen demonstriert werden. Die gemessene Dauer konnte um $\sim 7\%$ bzw. $\sim 4\text{ s}$ beim Modul mit acht Zellen reduziert werden. Beim Modul mit zehn Zellen wurden

~ 5 % bzw. ~ 4 s eingespart. Somit ist Grid Search im vorliegenden System dazu geeignet, die Gesamtdauer für das Trennen aller Zellkontaktierungen zu reduzieren.

8.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt sind positive Validierungsergebnisse zu verzeichnen. Bei der Untersuchung der Genauigkeit konnten Bahnabweichungen von schätzungsweise $e_b \leq 1 \text{ mm}$ festgestellt werden, sofern keine Verformung vorliegt. Positive Verformungen führen trotz kamerabasierter Verformungserfassung zu einer Erhöhung der Bahnabweichung, gleichzeitig erhöht sich hierbei auch der Spalt zwischen zwei Zellpolen und damit verbunden die Toleranz. Beim vorliegenden Fall (Werkzeugdurchmesser $d_w = 8 \text{ mm}$ und Brückenlänge $b_{l2} = 10 \text{ mm}$) sind die identifizierten Bahnabweichungen e_b unkritisch. Weiterhin konnten die Prozesssicherheit für das Trennen mittels Fräsen im flexiblen Demontagesystem sowie die Flexibilität bei zugleich hohem Automatisierungsgrad demonstriert werden. Die Pipeline wurde bis auf die Vorgabe der Zellanzahl ohne Benutzerangaben erfolgreich ausgeführt. Nach dem Trennen war ein sauberer Trennschnitt ersichtlich, was auf einen stabilen Prozess hindeutet. Zu guter Letzt konnte eine Optimierung der Gesamtdauer beispielhaft mit Grid Search gezeigt werden.

9 Bewertung

Nachfolgend wird eine kritische Bewertung der Dissertation vorgenommen und zugleich die Generalisierbarkeit bzw. Übertragbarkeit der erarbeiteten Teilsysteme diskutiert.

9.1 Allgemeine Bewertung

Der validierte Ansatz mit den erarbeiteten Teilsystemen (Trennprozess, Fräsbahnplanung, kamerabasierte Verformungserfassung, Trajektorienplanung, Codegenerierung) erhebt den Anspruch, die abgeleitete Zielsetzung aus Kapitel 3.1 unter den definierten Randbedingungen zu erfüllen. Nichtsdestotrotz liegen Grenzen vor, welche im Folgenden kritisch diskutiert werden.

In Bezug zum Produkt wurden nur Batteriemodule mit prismatischen Zellen adressiert, welche nur einseitig Zellkontaktierungen enthalten und elektrisch seriell miteinander verschaltet (Xs1p) sind. Diese bilden einen bedeutenden Anteil an Batteriemodulen am Markt ab. Für die Anwendung des gezeigten Ansatzes auf weitere Batteriemodulvarianten außerhalb des Betrachtungsraums sind besonders in den Teilsystemen Trennprozess und Fräsbahnplanung Nacharbeiten erforderlich. Weiterhin wurden alle störenden Hindernisse und Konturen ausgeblendet, was durch die einfache geometrische Form von Batteriemodulen legitim ist. Vereinzelt können Batteriemodule dennoch leicht vorstehende Strukturen (z. B. Gewindestifte an den Zellpolen) aufweisen. Eine Kollisionsanalyse in der Trajektorienplanung wäre hierbei zielführend. Zellkontaktierungen bilden einen Teil des Zellkontaktierungssystems, welches ebenfalls eine Trägerplatte für die Zellverbindungselemente (engl.: Busbars) beinhaltet. Die Trägerplatte besteht aus Kunststoff und stellt eine störende Komponente beim Fräsen der Busbars dar. Strategien zum vorgelagerten Entfernen der Trägerplatte bzw. bezüglich der Zerspanbarkeit durch den gleichen Prozess sind zu prüfen. Auch wurden vereinfachte Annahmen im Hinblick auf die Busbars angenommen (Vollmaterial, flaches Blech, einfach kontaktierend ...). Bei weiteren Varianten sind Nachuntersuchungen zum Trennprozess erforderlich.

Die Qualifikation des Trennprozesses hatte zum Ziel, einen linearen Frässchnitt an den Busbars prozesssicher und unter Berücksichtigung der produktspezifischen und kinematischen Randbedingungen zu erreichen. Hierzu wurde ein Fräswerkzeug mit stabilen Prozessparametern identifiziert und qualifiziert. Die industrielle und wirtschaftliche Einsatzfähigkeit erfordert nähere Untersuchungen im Hinblick auf die Standzeit. Einen

bedeutenden Faktor stellt in diesem Zusammenhang der Werkzeugverschleiß dar, den es zu minimieren gilt. Für die Standzeitoptimierung wäre beispielsweise der Vergleich mit weiteren passenden Fräswerkzeugen zielführend. Alternativ können weitere verschleißreduzierende Maßnahmen, wie eine Druckluftkühlung, untersucht werden. Einen Einflussfaktor bei der Zerspanung könnte die gebogene Form von umgeformten Busbars darstellen, welche in der vorliegenden Dissertation nicht betrachtet wurde. Es wird ein Kraftanstieg durch ein leicht erhöhtes Zerspanungsvolumen erwartet. Auch wird mit einem Anstieg der maximalen Temperaturen an der kritischsten Stelle gerechnet. Da sowohl die gemessenen Kräfte, welche einen Einfluss auf die Werkzeugbahnverschiebung beim Fräsen aufweisen, als auch die gemessenen Temperaturen deutlich unter den kritischen Werten lagen, sollte vermutlich auch das Trennen der gebogenen Busbars mit dem eingesetzten Werkzeug und Parameter möglich sein und sich nicht als kritisch erweisen. Die Frage nach der kritischen Spanlänge bleibt hingegen offen und ist experimentell zu untersuchen.

Mit der kamerabasierten Verformungserfassung wurde ein ganzheitlicher Ansatz erarbeitet, der für die Verformungserfassung von Batteriemodulen validiert wurde. Durch den holistischen Charakter ist der Einsatz auch für weitere Anwendungsfälle denkbar. Der Ansatz hat dennoch Grenzen. Im vorliegenden Fall liegt keine vollständige 3D-Aufnahme des Objekts vor. Es wird lediglich eine Aufnahme der Mantelfläche durchgeführt. Für das Trennen der Zellkontaktierungen, welche auf der Mantelfläche liegen, ist dies ausreichend. Für den Einsatz bei weiteren Fügeverbindungen bzw. anderen Demontageobjekten sind ggf. Modifikationen erforderlich. Einen weiteren zu untersuchenden Faktor stellt die begrenzte Genauigkeit der kamerabasierten Verformungserfassung dar, welche in dem Szenario *hohe Genauigkeit* bei ca. 1,5 mm lag (trotz Verschiebungen am Batteriemodul von mehreren Zentimetern). Als Gegenmaßnahme ist der Einsatz von höher auflösenden Kamerasystemen zu nennen. Weitere Einflussfaktoren stellen Umwelteinflüsse dar, wie z. B. die Beleuchtung oder die Temperatur, welche es zu prüfen und zu optimieren gilt. Auch könnte die Hyperparameteroptimierung in der Verarbeitungspipeline (insbesondere die nicht-starre Registrierung) eine Genauigkeitssteigerung erzielen.

Die gesamte Validierung konnte die Einsatzfähigkeit der vorliegenden flexiblen Demontageanlage für das Trennen der Zellkontaktierungen an Batteriemodulen aufzeigen. Dabei wurden Systemgenauigkeiten im Bereich von 1 mm ermittelt, sofern keine Verformungen am Batteriemodul vorliegen. Ursachen für die Ungenauigkeiten lassen sich auf

den eingesetzten 6-Achs-Knickarmroboter und damit verbundene Faktoren, wie z. B. statische Lasten am Flansch (z. B. Spindelgewicht), abweichende DH-Parameter oder ein zeitlich veränderliches Nachgiebigkeitsverhalten (z. B. durch Getriebeverschleiß), zurückführen. Die Integration der Ergebnisse aus Arbeiten zur Genauigkeitssteigerung, wie z. B. (Puzik 2011), (Rösch 2014) oder (Möller 2019), soll überprüft werden.

Der Eigenschwingungsbereich, hauptsächlich verantwortlich durch die ersten drei Hauptachsen, kann bei 6-Achs-Knickarmrobotern bis 100 Hz eingegrenzt werden (vgl. (Krauße 2014)). In dieser Arbeit wurden Schwingungen beim Fräsen hingegen vollkommen vernachlässigt. Dies ist beim betrachteten Anwendungsfall legitim, den es liegen hohe Spindeldrehzahlen bis 24.000 U/min (= 400 Hz) bei geringen auftretenden Kräften bis 100 N vor. Die auftretenden Schwingungen beim Trennprozess liegen somit außerhalb des prognostizierten Eigenschwingungsbereichs des Roboters. Bei den erfolgreich durchgeführten Trennversuchen an den Zellkontaktierungen mit dem 6-Achs-Knickarmroboter wurden keine optisch sichtbaren Schwingungen an der Kinematik beobachtet. Zudem zeigen die Trennproben keine klaren Schwingungsereignisse.

Trotz der Grenzen und Schwächen in den einzelnen Teilgebieten wurde ein allgemeiner Ansatz erarbeitet. Die Generalisierbarkeit bzw. Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle außerhalb der betrachteten Systemgrenzen wird nachfolgend diskutiert.

9.2 Generalisierbarkeit und Übertragbarkeit

Der Vorteil des gezeigten Ansatzes durch den modularen Charakter der erarbeiteten Teilsysteme (Trennprozess, CAD-basierte Fräsbahnplanung, kamerabasierte Verformungserfassung, (optimierte) Trajektorienplanung und Codegenerierung) besteht darin, dass diese einzeln austauschbar und durch äquivalente Teilsysteme ersetzbar sind, falls dies erforderlich ist.

Beispielsweise kann beim Trennen der Zellkontaktierungen statt auf den Fräsprozess alternativ auf einen Laserschneidprozess gesetzt werden. Hierbei sind gesondert Prozessuntersuchungen in Zusammenhang mit den produktspezifischen und kinematischen Randbedingungen durchzuführen. Die restlichen Teilsysteme können größtenteils mit ggf. leichten Anpassungen übernommen werden. Beim Einsatz von Laserschneidverfahren zum Trennen von Fügeverbindungen ist in Anbetracht der zahlreichen Gefahren durch Lithium-Ionen-Zellen sowie insbesondere wegen der enormen Temperaturentwicklungen beim Laserschneiden gründlich die Produkt-Prozess-Interaktion zu prüfen.

Ein weiteres Beispiel stellt der Ersatz des 6-Achs-Knickarmroboters durch eine klassische Werkzeugmaschine in Form eines 3-Achs-Bearbeitungszentrums dar. Hierbei entfällt die (optimierte) Trajektorienplanung, welche bei Einsatz von Industrierobotern erforderlich ist. Auf Basis der Fräsbahnplanung (im Werkstückkoordinatensystem) zusammen mit der kamerabasierten Verformungserfassung kann direkt die Codegenerierung erfolgen. Bei diesem Beispiel ist zu beachten, dass die für die Demontage erforderliche Flexibilität in Werkzeugmaschinen stark eingeschränkt ist.

Sind hingegen die Verformungen beim Batteriemodul bekannt (z. B. durch eine modellbasierte Vorhersage), kann auf die kamerabasierte Verformungserfassung verzichtet werden. Die extrahierten Stützpunkte (im Werkstückkoordinatensystem) aus der Fräsbahnplanung werden direkt der Trajektorienplanung übergeben. Wichtig ist die akkurate Bezugsherstellung zwischen den Koordinatensystemen der verbliebenen technischen Teilsysteme (Drehtisch, Werkstück und Roboter).

Nichtsdestotrotz soll betont werden, dass für die automatisierte und flexible Demontage von Lithium-Ionen-Batteriemodulen zum Trennen der Zellkontaktierungen sämtliche aufgelisteten Teilsysteme unabdingbar sind, wie bereits in Kapitel 2 dargelegt wurde.

Der erarbeitete Ansatz ist im Sinne der Generalisierbarkeit auf weitere Anwendungsfälle zum Trennen von mechanischen, nichtlösbaren Fügeverbindungen übertragbar. Hierfür sind ggf. ein Austausch der Teilsysteme und damit verbundene Nachuntersuchungen erforderlich. Eine zusammenfassende Übersicht, welche Teilsysteme in anderen Anwendungsfällen ohne größere Änderung zur Anwendung kommen können, ist in Tabelle 9-1 aufgeführt.

Die erarbeiteten Ergebnisse können auch auf Busbars in weiteren Varianten von Lithium-Ionen-Batteriemodulen außerhalb der betrachteten Systemgrenzen übertragen werden. Für das Trennen von mehrfach kontaktierenden Busbars, welche mehr als zwei Zellpole (2p, 3p ...) verbinden, ist lediglich eine Erweiterung der CAD-basierten Fräsbahnplanung zur automatischen Stützstellenextraktion vorzunehmen. Dies gilt ebenfalls für gegenüberliegende Zellterminals, wie es z. B. bei den flachen, prismatischen Zellen der Cell-to-Pack-Technologie der Fall ist.

Das Trennen von mechanischen, nichtlösbaren Fügeverbindungen in Batteriemodulen, wie z. B. Niet- und Schweißverbindungen bzw. Bördelungen am Batteriemodulgehäuse, ist mit wechselnden Werkstoffen (Aluminium- oder Stahllegierungen) sowie komplexen Geometrien, die einen nichtlinearen Schnitt erfordern, verbunden. Aus diesem Grund

ist die CAD-basierte Bahnplanung zur automatisierten Stützstellenextraktion anhand neu definierter Regeln zu überarbeiten. Da der Fräsprozess stark materialabhängig ist, sind für neue Werkstoffe gesonderte Untersuchungen im Hinblick auf den Trennprozess durchzuführen.

Weiterhin finden sich in solchen Demontageobjekten wie Waschmaschinen und Elektromotoren mechanische, nichtlösbare Fügeverbindungen wieder, welche durch einen Fräsprozess flexibel und automatisiert gelöst werden können. Analog zu den Fügeverbindungen in Batteriemodulen erfordern diese aufgrund von wechselnden Werkstoffen und komplexen Geometrien Anpassungen in den Teilsystemen *Trennprozess* sowie *CAD-basierte Fräsbahnplanung*. Außerdem ist zu prüfen, ob sich geometrische Verformungen in Grenzen halten und somit auf die kamerabasierte Verformungserfassung verzichtet werden kann.

Tabelle 9-1: Weiterverwendung der Teilsysteme in weiteren Anwendungsfällen

Anwendungsfall	Trennprozess	Fräsbahnplanung	Verformungserfassung	Trajektorienplanung	Codegenerierung
Mehrfachkontaktierung und gegenüberliegende Busbars	X	-	X	X	X
Andere Materialien und komplexe Schnittformen	-	-	X	X	X
Andere Demontageobjekte wie Waschmaschine oder Elektromotor	-	-	X	X	X

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die erarbeiteten Teilsysteme *kamerabasierte Verformungserfassung*, *Trajektorienplanung* sowie *Codegenerierung* weitestgehend im Kontext des automatisierten und flexiblen Trennens von mechanischen, unlösbaren Fügeverbindungen bei der Demontage eingesetzt werden können. Die Anwendung auf weitere Verbindungsarten bei prismatischen Lithium-Ionen-Zellen (neben der einfachen Zellkontaktierung) erfordert jedoch Nacharbeiten im Trennprozess sowie in der CAD-basierten Fräsbahnplanung. Dennoch leistet der erarbeitete Ansatz einen als universell zu bezeichnenden Beitrag zur flexiblen und automatisierten Demontage von Traktionsbatterien.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Das Kapitel legt eine Zusammenfassung der vorliegenden Dissertation dar und gewährt einen Ausblick in mögliche weitere Arbeiten.

10.1 Zusammenfassung

Steigende Absatzzahlen von elektrisch betriebenen Fahrzeugen sind in den nächsten Jahren zu erwarten. Das teuerste System im elektrischen Antriebsstrang stellt die Lithium-Ionen-Traktionsbatterie dar, welche nach ihrem Lebensende von schätzungsweise zehn bis 15 Jahren einer passenden End-of-Life-Strategie unterzogen werden müsste. Das Remanufacturing sowie das direkte Recycling sind vielversprechende Strategien, die jedoch eine Demontagetiefe bis auf Zell- bzw. Elektrodenebene erfordern. Den aktuellen Stand der Technik bildet die händische Demontage bis auf Batteriemodulebene mit nachgelagertem Schreddern. Die zu erwartende hohe Losgröße erfordert hingegen ein System mit einem möglichst hohen Automatisierungsgrad. Daher wird die automatisierte Zerlegung der Batteriemodule fokussiert. Einen kritischen Schritt in der automatisierten Zerlegung stellt das Trennen der Zellkontaktierungen dar, bei dem das spanende Verfahren ein großes Einsatzpotenzial aufweist. Dieser Prozessschritt wird durch folgende Spannungsfelder gekennzeichnet: Gefahren durch Lithium-Ionen-Batteriezellen in Kombination mit (teil)zerstörenden Trennverfahren, Variantenvielfalt der Batteriemodule sowie geometrische Verformungen, bedingt durch den Atmungseffekt der Lithium-Ionen-Zellen und Bauteiltoleranzen.

Die vorliegende Dissertation setzt sich somit zum Ziel, die angeführten Herausforderungen einzeln zu adressieren und eine gesamtheitliche Lösung zu erarbeiten. Angestrebt wird das flexible und automatisierte Trennen der Zellkontaktierungen unter Einsatz eines spanenden Verfahrens mit Kompensation der geometrischen Verformung mithilfe einer 3D-Kamera. Die Lösung soll in eine bestehende flexible Roboterzelle für die Demontage von Lithium-Ionen-Batteriemodulen eingebunden und validiert werden.

Zur Zielerreichung wurde zunächst eine Anforderungsanalyse und Problemdefinition, beginnend mit der Produktanalyse, durchgeführt. Auf Basis einer Marktanalyse wurde eine Eingrenzung im Hinblick auf den Zelltyp (prismatische Zelle), die Zellgeometrie, den topologischen Batteriemodulaufbau, die geometrische Form und das Material der Busbars, mögliche geometrische Verformungen sowie bezüglich der Gefahren, die von Lithium-Ionen-Zellen ausgehen, vorgenommen. Im Fokus stehen Batteriemodule mit

prismatischen Zellen, welche einfach seriell miteinander elektrisch kontaktiert werden. Das sogenannte Zellverbindungselement (engl.: Busbar) ist vereinfacht dargestellt ein flaches, rechteckiges Plättchen bis max. 2,5 mm Dicke. Als Werkstoff kommt vorwiegend reines Aluminium der Spezifikation AW1050A zum Einsatz. Ausgehend von der Analyse des Trennproblems wurden Lösungsalternativen, bestehend aus Trennstrategie und Trennverfahren, formuliert. Als passendste Lösung wurde die Ausprägung von Schlitzten auf der Busbarmitte mithilfe des Schaftfräsens identifiziert. Dies bildet die Grundlage für die Anforderungsdefinition des fokussierten Prozessschrittes an das Demontagesystem für Batteriemodule, unterteilt in Kinematik sowie Spannsystem, Werkzeug und Kamerasystem.

Für die kamerabasierte Verformungserfassung ist die Bezugsherstellung zwischen den Koordinatensystemen der verschiedenen Teilsysteme (Roboter, Kamera, Spannsystem als Drehtisch sowie Werkstück) erforderlich. Hierfür wurde ein erprobter Ansatz unter Nutzung eines Hand-to-Eye-Kalibrierungsverfahrens vorgestellt. Die Bezugsherstellung zwischen Kamera und Drehtisch sowie zwischen Kamera und Roboter steht dabei im Vordergrund. Des Weiteren wurde eine integrierte Verarbeitungspipeline für die Verarbeitung von 3D-Punktwolken aus einer 3D-Streifenlichtprojektionskamera präsentiert. Den Kern der Pipeline bildet eine Kombination aus starren und nicht-starren Registrierungsalgorithmen. Während die starre Registrierung eine optimale Positions- und Orientierungstransformation zwischen Referenzmodell und realem Objekt bestimmt, bildet die nicht-starre Registrierung die Verformung des realen Objekts durch gezielte Deformation des Referenzmodells ab. Die Pipeline ist in der Lage, ausgehend vom CAD-Modell mit vorgegebenen Stützstellen sowie 3D-Kameraaufnahmen des Batteriemoduls die Stützstellen im realen, verformungsbehafteten Batteriemodul zu lokalisieren. Bei der Validierung der Pipeline anhand von zwei verschiedenen Batteriemodulvarianten konnte zum einen die Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden. Zum anderen konnten trotz induzierter Verformung im Zentimeter-Bereich Genauigkeiten unter 2 mm bei kurzen Laufzeiten aller Verarbeitungsoperationen unter 10 s nachgewiesen werden, was die industrielle Einsatzfähigkeit zeigt. Beim vorliegenden Anwendungsfall sind diese Genauigkeiten ausreichend, da ein Spielraum von wenigen Millimetern vorliegt.

Für die Qualifizierung des Prozesses zum Trennen der Zellkontaktierungen wurde zunächst eine Zerspanungsstrategie definiert. Hierzu wurden Werkzeuge und Prozessparameter vorausgewählt, die durch Versuche zur Ermittlung eines stabilen

Prozessparameters qualifiziert wurden. Dabei hat der Garant VHM-Fräser (DIN 6535) mit 8 mm Durchmesser die besten Resultate erbracht. Für diesen wurde ein weitestgehend stabiles Prozessfenster im Zahnvorschubbereich f_z von $0,02\text{ mm} - 0,2\text{ mm}$ sowie Schnittgeschwindigkeitsbereich v_c innerhalb von $200\frac{\text{m}}{\text{min}} - 600\frac{\text{m}}{\text{min}}$ ermittelt. Weiterhin fand eine empirische Absicherung hinsichtlich produktbezogener, kritischer Größen statt. Innerhalb des stabilen Prozessparameters wurden Temperaturen bis 48 °C an der kritischsten Position gemessen. Die kritische Länge des entstehenden Spans – definiert als der Abstand zwischen den zwei entferntesten Punkten des Spans – beschränkte sich auf maximal $6,4\text{ mm}$. Der Einsatz des Planfräsens mit dem ausgewählten VHM-Fräser beim Trennen der Zellkontaktierungen gilt somit für die Referenzzelle CATL NMC 48Ah 3,7V als unbedenklich.

Anschließend kam die Betrachtung der kinematischen Randbedingungen durch den verwendeten 6-Achs-Knickarmroboter hinzu. Es existieren Betriebspunkte (Wertekombinationen aus Spindelorientierung θ_{TCP} und Drehtischwinkelstellung θ_7), bei welchen alle Punkte durch das Werkzeug im betrachteten Untersuchungsvolumen erreicht werden können. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass Betriebspunkte vorliegen, bei der die zum Fräsen erforderliche Vorschubgeschwindigkeit überall im Untersuchungsvolumen erreicht wird. Der Einfluss der Prozesskraft auf die Werkzeugbahnverschiebung aufgrund der Strukturnachgiebigkeit wird in allen drei Raumrichtungen auf unter $0,2\text{ mm}$ geschätzt und kann folglich vernachlässigt werden. Somit können Zellkontaktierungen mittels Fräsen mit dem eingesetzten 6-Achs-Knickarmroboter bedenkenlos ohne signifikanten Bahndrift getrennt werden.

Für ein aufwandsarmes Einrichten und die Programmierung der Anlage für neue Varianten wurde das Thema Demontageplanung auf Basis einer CAD-Datei adressiert. Das Ergebnis stellt eine automatisierte Pipeline zur Extraktion von Stützstellen für die Fräsbahnplanung dar. Dies erfolgte auf der Grundlage von definierten Regeln zur Identifikation von Busbars sowie zur Extraktion der Start- und Endpositionen für die Fräsoperation. Auf Basis der extrahierten Stützstellen erfolgte die Trajektorienplanung sowie die Steuerungscodegenerierung. Da in der vorliegenden Demontageanlage ein unendlicher Lösungsraum für die Anlagenkonfiguration vorhanden ist, wurden passende Optimierungsverfahren gegenübergestellt. Als besonders geeignet erwiesen sich Grid Search und Pattern Search zur Optimierung der offenen Anlagenkonfigurationsparameter. Die erarbeiteten Teilsysteme wurden zu einem Gesamtsystem in Form einer übergeordneten Verarbeitungspipeline integriert.

Im Anschluss wurde das flexible und automatisierte Trennen der Zellkontaktierungen an verformungsbehafteten Batteriemodulen mit prismatischen Dummyzellen unter Einsatz des Schafffräsens in der bestehenden Demontageanlage validiert. Die induzierten geometrischen Verformungen beim Demontageobjekt wurden mithilfe einer 3D-Kamera erfolgreich erfasst und kompensiert. Weiterhin konnten die Prozesssicherheit beim Fräsen der Busbars in der Demontageanlage sowie die Produktflexibilität anhand der variierenden Zellanzahl gezeigt werden. Durch den Einsatz von Grid Search als globales Optimierungsverfahren wurde die Zeitersparnis bei der Gesamtbearbeitung nachgewiesen. Die gesetzte Zielsetzung konnte somit weitestgehend erfüllt werden.

10.2 Ausblick

Trotz der Entwicklung eines neuartigen Gesamtsystems für das flexible und automatisierte Trennen der Zellkontaktierungen ergeben sich weiterführende Aufgaben sowie Fragestellungen. Das Trennen der Zellkontaktierungen stellt lediglich einen Teil der gesamten Prozesskette bei der Demontage von Lithium-Ionen-Batteriemodulen dar. Weitere Prozessschritte für die gezeigte Demontageanlage sind näher zu untersuchen und in die gesamte Demontageprozesskette zu integrieren. Eine offene Fragestellung beim Trennen der Zellkontaktierungen ist die Entfernung der Reste des Zellverbindungselements, welche noch stoffschlüssig mit dem Zellterminal verbunden sind. Nachbearbeitende Verfahren für ein prozesssicheres und wirtschaftliches Trennen der Reste sind zu evaluieren. Im Rahmen der Dissertation wurde das ausgewählte Trennverfahren mit einem definierten Werkzeug für den vorliegenden Anwendungsfall qualifiziert. Es besteht weiterhin Potenzial zur Optimierung des Fräsprozesses. Beispielsweise kann eine Produktivitätssteigerung durch höhere Prozessgeschwindigkeiten erzielt werden. Auch besteht Optimierungspotenzial im Hinblick auf Bearbeitungskosten durch eine Reduzierung des Werkzeugverschleißes. Beides kann beispielsweise durch Druckluftkühlung erzielt werden, was systematisch untersucht werden sollte. Einen weiteren kritischen Prozessschritt bei der Batteriemoduldemontage stellt das Trennen der Klebeverbindung zwischen den Zellen dar. Die kritische Einstufung ist ähnlich wie bei Zellkontaktierungen ebenfalls auf die Nähe zu den Zellen in Kombination mit dem erforderlichen (teil)zerstörenden Verfahren zurückzuführen. Chemische, unlösbare Fügeverbindungen wie Klebeverbindungen unterschieden sich signifikant von mechanischen, unlösbaren Fügeverbindungen und erfordern eine andere Klasse an Trennverfahren. Auch dies stellt ein Forschungsgebiet mit viel Handlungsbedarf dar, welches ebenfalls für die automatisierte Batteriemodulzerlegung von großer Bedeutung ist.

Publikationsliste des Autors

Die nachfolgenden aufgeführten Publikationen sind während der Tätigkeit des Verfassers der vorliegenden Arbeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik entstanden.

(Fleischer et al. 2021)

Fleischer, J.; **Gerlitz, E.**; Rieß, S.; Coutandin, S. & Hofmann, J. (2021), „Concepts and Requirements for Flexible Disassembly Systems for Drive Train Components of Electric Vehicles“, *Procedia CIRP*, 98, S. 577–582. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.154>.

(Gerlitz et al. 2021)

Gerlitz, E.; Botzem, D.; Weinmann, H.; Ruhland, J. & Fleischer, J. (2021), „Cell-to-Pack-Technologie für Li-Ionen-Batterien“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(10), S. 689–694. <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0146>.

(Gerlitz et al. 2021)

Gerlitz, E.; Greifenstein, M.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2021), „Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System“, *Procedia CIRP*, 96, S. 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.071>.

(Hillenbrand et al. 2021)

Hillenbrand, J.; Gönnheimer, P.; **Gerlitz, E.** & Fleischer, J. (2021), „Design and implementation of a holistic framework for data integration in industrial machine and sensor networks“, *Procedia CIRP*, 104, S. 1771–1776. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.298>.

(Gerlitz et al. 2022)

Gerlitz, E.; Greifenstein, M.; Kaiser, J.-P.; Mayer, D.; Lanza, G. & Fleischer, J. (2022), „Systematic Identification of Hazardous States and Approach for Condition Monitoring in the Context of Li-ion Battery Disassembly“, *Procedia CIRP*, 107, S. 308–313. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.050>.

(Mühlbeier et al. 2022)

Mühlbeier, E.; Oexle, F.; **Gerlitz, E.**; Matkovic, N.; Gönnheimer, P. & Fleischer, J. (2022), „Conceptual control architecture for future highly flexible production systems“, *Procedia CIRP*, 106, S. 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.152>.

(Gerlitz et al. 2023)

Gerlitz, E.; Enslin, L.-E. & Fleischer, J. (2023), „Computer vision application for industrial Li-ion battery module disassembly“, *Production Engineering*.

<https://doi.org/10.1007/s11740-023-01231-5>.

(Gerlitz et al. 2023)

Gerlitz, E.; Fuchs, T.; Kößler, F. & Fleischer, J. (2023), „Flexible Roboterzelle für Traktionsbatterie-Demontage“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 118(12), S. 853–857. <https://doi.org/10.1515/zwf-2023-1178>.

(Mangold et al. 2023)

Mangold, S.; **Gerlitz, E.**; Zimprich, S.; Friedmann, M.; Matthiesen, S. & Fleischer, J. (2023), „Systematic quantitative investigation of the unscrewing process with regard to breakaway torque“, *Journal of Remanufacturing*, 13(1), S. 53–66.

<https://doi.org/10.1007/s13243-022-00120-x>.

(Merz et al. 2023)

Merz, D.; **Gerlitz, E.**; Kaiser, J.-P. & Fleischer, J. (2023), „Anomalieerkennung bei der Li-Ionen-Zellkontaktierung“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 118(11), S. 790–794. <https://doi.org/10.1515/zwf-2023-1146>.

(Schade et al. 2023)

Schade, F.; Kreutzer, M.; Mühlbeier, E.; **Gerlitz, E.**; Gönninger, P.; Fleischer, J. & Becker, J. (2023), „Modular Hardware/Software Architecture for Edge Units in Highly Flexible Manufacturing Systems“, *Procedia CIRP*, 120, S. 601–606.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.045>.

(Goes et al. 2024)

Goes, D.; **Gerlitz, E.**; Kagon, M.; Möllers, H.; Kößler, F. & Fleischer, J. (2024), „Separation of adhesive joints of pouch cells in the context of battery module disassembly“, *Sustainable Materials and Technologies*, 42, e01174.

<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01174>.

Literaturverzeichnis

Literaturangaben nach dem Schema (A_<Nachname> <Jahr>) beziehen sich auf studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser dieser Arbeit inhaltlich und organisatorisch angeleitet wurden.

(A_Auer&Biller 2022)

Auer&Biller (2022), *Modellierung nicht-lösbarer mechanischer Verbindungen der Zellkontaktierung von Li-Ionen Batteriemodulen*. Seminararbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Institut für Produktionstechnik (wbk).

(A_Enslin 2022)

Enslin, L.-E. (2022), *Kamerabasierte Punktllokalisierung auf Oberflächen von verformungsbehafteten Li-Ion-Traktionsbatteriemodulen für die automatisierte Demontage*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Institut für Produktionstechnik (wbk).

(A_Littau 2020)

Littau, D. (2020), *Lösen von Schweiß- und Nietverbindungen im Kontext der Lithium-Ionen-Batterie Demontage*. Seminararbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Institut für Produktionstechnik (wbk).

(A_Richter 2023)

Richter, M. (2023), *Automatisierte Fräsbahnfindung und Roboterbahnplanung am Anwendungsfall der Batteriemoduldemontage*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Institut für Produktionstechnik (wbk).

(A_Zöller 2023)

Zöller, J. (2023), *Experimentelle Untersuchung des Fräsprozesses zum Trennen von Zellkontaktierungen in der Batteriemoduldemontage*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Institut für Produktionstechnik (wbk).

(ABB Group 2021)

ABB Group (2021), *Prognostizierter Absatz von Personenkraftwagen weltweit nach Antrieb von 2021 bis 2040 (in 1.000 Fahrzeuge)*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1244924/umfrage/pkw-absatz-weltweit-nach-antrieb/> [22.09.2023].

(Al Assadi et al. 2022)

Al Assadi, A.; Holtz, D.; Nägele, F.; Nitsche, C.; Kraus, W. & Huber, M. F. (2022), „Machine learning based screw drive state detection for unfastening screw connections“, *Journal of Manufacturing Systems*, 65, S. 19–32.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.07.013>.

(Alfaro-Algaba & Ramirez 2020)

Alfaro-Algaba, M. & Ramirez, F. J. (2020), „Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing“, *Resources, Conservation and Recycling*, 154, S. 104461.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104461>.

(Alibrahim & Ludwig 2021)

Alibrahim, H. & Ludwig, S. A. (2021), „Hyperparameter Optimization: Comparing Genetic Algorithm against Grid Search and Bayesian Optimization“. *2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Kraków, Poland, S. 1551–1559.
<https://doi.org/10.1109/cec45853.2021.9504761>.

(Apprich et al. 2020)

Apprich, T.; Brenner, J.; Dambacher, M.; Dreher, F.; Fischer, G.; Greiner, G.; Heine, B.; Hochstatter, A.; Holzberger, S.; Holzwarth, F.; Kaiser, H.; Liesch, T.; Pflug, A.; Schmid, D.; Tawakoli, T. & Vogel, R. (2020), *Tabellenbuch für Zerspan-technik*, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten. ISBN: 9783758510717.

(Bailey-Van Kuren 2006)

Bailey-Van Kuren, M. (2006), „Flexible robotic demanufacturing using real time tool path generation“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(1), S. 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.01.002>.

(Barker 1999)

Barker, J. (1999), „In-situ measurement of the thickness changes associated with cycling of prismatic lithium ion batteries based on LiMn2O4 and LiCoO2“, *Electrochimica Acta*, 45(1-2), S. 235–242. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(99\)00207-8](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(99)00207-8).

(Basdere & Seliger 2003)

Basdere, B. & Seliger, G. (2003), „Disassembly factories for electrical and electronic products to recover resources in product and material cycles“, *Environmental science & technology*, 37(23), S. 5354–5362. <https://doi.org/10.1021/es034555g>.

(Becker et al. 2019)

Becker, J.; Beverungen, D.; Winter, M. & Menne, S. (2019), *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-21020-5.

(Besl & McKay 1992)

Besl, P. J. & McKay, N. D. (1992), „A method for registration of 3-D shapes“, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14(2), S. 239–256.
<https://doi.org/10.1109/34.121791>.

(Beyerer et al. 2016)

Beyerer, J.; Puente León, F. & Frese, C. (2016), *Automatische Sichtprüfung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-47785-4.

(Blankemeyer et al. 2021)

Blankemeyer, S.; Wiens, D.; Wiese, T.; Raatz, A. & Kara, S. (2021), „Investigation of the potential for an automated disassembly process of BEV batteries“, *Procedia CIRP*, 98, S. 559–564. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.151>.

(BloombergNEF 2023)

BloombergNEF (2023), *Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh*. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/> [24.03.2024].

(Böge et al. 2021)

Böge, A.; Böge, W.; Arndt, K.-D.; Bahmann, W.; Barfels, L.; Bauer, J.; Böge, G.; Dehli, M.; Heinrich, B.; Hirsch, A.; Kampf, M.; Kemnitz, A.; Kurzweil, P.; Labisch, S.; Linke, P.; Roddeck, W.; Schreiner, K.; Sebulke, J.; Surek, D.; Weidemann, F. & Weißbach, W. (Hrsg.) (2021), *Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg. ISBN: 978-3-658-30272-6.

(Bogue 2019)

Bogue, R. (2019), „Robots in recycling and disassembly“, *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 46(4), S. 461–466.
<https://doi.org/10.1108/IR-03-2019-0053>.

(Bongardt, T. 2003)

Bongardt, T. (2003), *Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf*

die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern. Dissertation, Technische Universität München.

(Büker et al. 2001)

Büker, U.; Drüe, S.; Götze, N.; Hartmann, G.; Kalkreuter, B.; Stemmer, R. & Trapp, R. (2001), „Vision-based control of an autonomous disassembly station“, *Robotics and Autonomous Systems*, 35(3-4), S. 179–189. [https://doi.org/10.1016/s0921-8890\(01\)00121-x](https://doi.org/10.1016/s0921-8890(01)00121-x).

(Buss 2004)

Buss, S. (2004), „Introduction to inverse kinematics with Jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods“, *IEEE Transactions in Robotics and Automation*, 17.

(Bustos & Chin 2018)

Bustos, A. P. & Chin, T.-J. (2018), „Guaranteed Outlier Removal for Point Cloud Registration with Correspondences“, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 40(12), S. 2868–2882. <https://doi.org/10.1109/tpami.2017.2773482>.

(Cai & Zhou 2011)

Cai, D. G. & Zhou, T. R. (2011), „Research on CAD Model Data Conversion for RP Technology“, *WGP Congress 2016*, 314-316, S. 2253–2258. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.314-316.2253>.

(Casals et al. 2019)

Casals; Rodríguez; Corchero & Carrillo (2019), „Evaluation of the End-of-Life of Electric Vehicle Batteries According to the State-of-Health“, *World Electric Vehicle Journal*, 10(4), S. 63. <https://doi.org/10.3390/wevj10040063>.

(Chen et al. 2020)

Chen, W. H.; Foo, G.; Kara, S. & Pagnucco, M. (2020), „Application of a multi-head tool for robotic disassembly“, *Procedia CIRP*, 90, S. 630–635. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.047>.

(Choux et al. 2021)

Choux, M.; Marti Bigorra, E. & Tyapin, I. (2021), „Task Planner for Robotic Disassembly of Electric Vehicle Battery Pack“, *Metals*, 11(3), S. 387. <https://doi.org/10.3390/met11030387>.

(Clerici et al. 2022)

Clerici, D.; Mocera, F. & Somà, A. (2022), „Electrochemical–mechanical multi-scale model and validation with thickness change measurements in prismatic lithium-ion batteries“, *Journal of Power Sources*, 542, S. 231735.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231735>.

(Cluzel 2019)

Cluzel, C. (2019), *Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond*. <https://www.transportenvironment.org/articles/batteries-wheels-role-battery-electric-cars-eu-power-system-and-beyond> [24.03.2024].

(Das et al. 2019)

Das; Barai; Masters & Williams (2019), „Comparison of Tab-To-Busbar Ultrasonic Joints for Electric Vehicle Li-Ion Battery Applications“, *World Electric Vehicle Journal*, 10(3), S. 55. <https://doi.org/10.3390/wevj10030055>.

(Denkena & Tönshoff 2011)

Denkena, B. & Tönshoff, H. K. (2011), *Spanen*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-19771-0.

(Dietrich & Richter 2020)

Dietrich, J. & Richter, A. (2020), *Praxis der Zerspantechnik. Verfahren, Prozesse, Werkzeuge*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg. ISBN: 978-3-658-30966-4.

(DIN 8580)

DIN 8580 (2022), *DIN 8580:2022-12, Fertigungsverfahren- Begriffe, Einteilung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN 8589-2)

DIN 8589-2 (2003), *DIN 8589-2:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen - Teil 2: Bohren, Senken, Reiben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN 8589-3)

DIN 8589-3 (2003), *DIN 8589-3:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen - Teil 3: Fräsen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN 8590)

DIN 8590 (2003), *DIN 8590:2003-09, Fertigungsverfahren Abtragen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN 12405-1)

DIN EN 12405-1 (2022), *DIN EN 12405-1:2022-02, Gaszähler - Umwerter - Teil 1: Volumenumwertung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN 12405-2)

DIN EN 12405-2 (2012), *DIN EN 12405-2:2012-10, Gaszähler - Umwerter - Teil 2: Energieumwertung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN 12405-3)

DIN EN 12405-3 (2016), *DIN EN 12405-3:2016-04, Gaszähler - Umwerter - Teil 3: Flowcomputer*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN IEC 62619)

DIN EN IEC 62619 (2023), *DIN EN IEC 62619:2023-08, Sekundärzellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nicht-säurehaltigen Elektrolyten - Sicherheitsanforderungen an sekundäre Lithiumzellen und -batterien für die Verwendung in industriellen Anwendungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN IEC 62660-3)

DIN EN IEC 62660-3 (2023), *DIN EN IEC 62660-3:2023-08, Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen - Teil 3: Sicherheitsanforderungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN ISO 10218-1)

DIN EN ISO 10218-1 (2012), *DIN EN ISO 10218-1:2012-01, Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN ISO 10218-2)

DIN EN ISO 10218-2 (2012), *DIN EN ISO 10218-2:2012-06, Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN ISO 12100)

DIN EN ISO 12100 (2011), *DIN EN ISO 12100:2011-03, Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(ElSayed et al. 2012)

ElSayed, A.; Kongar, E.; Gupta, S. M. & Sobh, T. (2012), „A Robotic-Driven Disassembly Sequence Generator for End-Of-Life Electronic Products“, *Journal of*

Intelligent & Robotic Systems, 68(1), S. 43–52. <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9667-8>.

(Emmanuel & Chinedu 2013)

Emmanuel, S. O. & Chinedu, E. (2013), „Automation of generation of models for disassembly process planning for recycling“. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, UK.

(Ester et al. 1996)

Ester, M.; Kriegel, H.-P.; Sander, J. & Xu, X. (1996), „A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise“. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Portland, Oregon, USA, S. 226–231.

(Fleischer et al. 2021)

Fleischer, J.; Gerlitz, E.; Rieß, S.; Coutandin, S. & Hofmann, J. (2021), „Concepts and Requirements for Flexible Disassembly Systems for Drive Train Components of Electric Vehicles“, *Procedia CIRP*, 98, S. 577–582. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.154>.

(Foo et al. 2022)

Foo, G.; Kara, S. & Pagnucco, M. (2022), „Challenges of robotic disassembly in practice“, *Procedia CIRP*, 105, S. 513–518. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.085>.

(Fritz 2018)

Fritz, A. H. (2018), *Fertigungstechnik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-56534-6.

(Fritz & Schulze 2015)

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

(GB/T 34013)

GB/T 34013 (2017), *GB/T 34013-2017, Dimension of traction battery for electric vehicles*.

(Gerlitz et al. 2021a)

Gerlitz, E.; Greifenstein, M.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2021), „Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated

Disassembly System“, *Procedia CIRP*, 96, S. 175–180.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.071>.

(Gerlitz et al. 2022)

Gerlitz, E.; Greifenstein, M.; Kaiser, J.-P.; Mayer, D.; Lanza, G. & Fleischer, J. (2022), „Systematic Identification of Hazardous States and Approach for Condition Monitoring in the Context of Li-ion Battery Disassembly“, *Procedia CIRP*, 107, S. 308–313. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.050>.

(Gerlitz et al. 2023a)

Gerlitz, E.; Enslin, L.-E. & Fleischer, J. (2023), „Computer vision application for industrial Li-ion battery module disassembly“, *Production Engineering*.
<https://doi.org/10.1007/s11740-023-01231-5>.

(Gerlitz et al. 2021b)

Gerlitz, E.; Botzem, D.; Weinmann, H.; Ruhland, J. & Fleischer, J. (2021), „Cell-to-Pack-Technologie für Li-Ionen-Batterien“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116(10), S. 689–694. <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0146>.

(Gerlitz et al. 2023b)

Gerlitz, E.; Fuchs, T.; Kößler, F. & Fleischer, J. (2023), „Flexible Roboterzelle für Traktionsbatterie-Demontage“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 118(12), S. 853–857. <https://doi.org/10.1515/zwf-2023-1178>.

(Gil et al. 2007)

Gil, P.; Pomares, J.; Diaz, S. v. P. C.; Candelas, F. & Torres, F. (2007), „Flexible multi-sensorial system for automatic disassembly using cooperative robots“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(8), S. 757–772.
<https://doi.org/10.1080/09511920601143169>.

(Glöser-Chahoud et al. 2021)

Glöser-Chahoud, S.; Huster, S.; Rosenberg, S.; Baazouzi, S.; Kiemel, S.; Singh, S.; Schneider, C.; Weeber, M.; Miehe, R. & Schultmann, F. (2021), „Industrial disassembling as a key enabler of circular economy solutions for obsolete electric vehicle battery systems“, *Resources, Conservation and Recycling*, 174, S. 105735. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105735>.

(Gräser, R.-G. 1999)

Gräser, R.-G. (1999), *Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern*. Dissertation, Technische Universität München.

(Gumanova & Sobotova 2019)

Gumanova, V. & Sobotova, L. (2019), „Proposal for Disassembly of Electric Vehicle Batteries used in the Volkswagen Jetta Hybrid System“. *2019 International Council on Technologies of Environmental Protection (ICTEP)*, Starý Smokovec, Slovakia, S. 100–106. <https://doi.org/10.1109/ICTEP48662.2019.8968977>.

(Gungor & Gupta 1998)

Gungor, A. & Gupta, S. M. (1998), „Disassembly sequence planning for products with defective parts in product recovery“, *Computers & Industrial Engineering*, 35(1-2), S. 161–164. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(98\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(98)00047-3).

(Harper et al. 2019)

Harper, G.; Sommerville, R.; Kendrick, E.; Driscoll, L.; Slater, P.; Stolkin, R.; Walton, A.; Christensen, P.; Heidrich, O.; Lambert, S.; Abbott, A.; Ryder, K.; Gaines, L. & Anderson, P. (2019), „Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles“, *Nature*, 575(7781), S. 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>.

(Hellmuth et al. 2021)

Hellmuth, J. F.; DiFilippo, N. M. & Jouaneh, M. K. (2021), „Assessment of the automation potential of electric vehicle battery disassembly“, *Journal of Manufacturing Systems*, 59, S. 398–412. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.009>.

(Hirose 2021a)

Hirose, O. (2021), „A Bayesian Formulation of Coherent Point Drift“, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 43(7), S. 2269–2286. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.2971687>.

(Hirose 2021b)

Hirose, O. (2021), „Acceleration of Non-Rigid Point Set Registration With Downsampling and Gaussian Process Regression“, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 43(8), S. 2858–2865. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.3043769>.

(Hohm et al. 2000)

Hohm, K.; Muller Hofstede, H. & Tolle, H. (2000), „Robot assisted disassembly of

electronic devices“. *2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Proceedings*, Takamatsu, Japan, S. 1273–1278.

<https://doi.org/10.1109/IROS.2000.893194>.

(Hooke & Jeeves 1961)

Hooke, R. & Jeeves, T. A. (1961), „Direct Search“ Solution of Numerical and Statistical Problems“, *Journal of the ACM*, 8(2), S. 212–229.

<https://doi.org/10.1145/321062.321069>.

(Horaud & Dornaika 1995)

Horaud, R. & Dornaika, F. (1995), „Hand-Eye Calibration“, *The International Journal of Robotics Research*, 14(3), S. 195–210.

<https://doi.org/10.1177/027836499501400301>.

(Huang et al. 2021a)

Huang, X.; Mei, G.; Zhang, J. & Abbas, R. (2021), *A comprehensive survey on point cloud registration*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.02690>.

(Huang et al. 2021b)

Huang, J.; Pham, D. T.; Li, R.; Qu, M.; Wang, Y.; Kerin, M.; Su, S.; Ji, C.; Mohamed, O.; Khalil, R.; Stockton, D.; Xu, W.; Liu, Q. & Zhou, Z. (2021), „An experimental human-robot collaborative disassembly cell“, *Computers & Industrial Engineering*, 155, S. 107189. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107189>.

(Imen et al. 2020)

Imen, B.; Moncef, H.; Moez, T. & Nizar, A. (2020), „Generation of disassembly plans and quality assessment based on CAD data“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(12), S. 1300–1320.

<https://doi.org/10.1080/0951192x.2020.1815852>.

(Issaoui et al. 2017)

Issaoui, L.; Aifaoui, N. & Benamara, A. (2017), „Modelling and implementation of geometric and technological information for disassembly simulation in CAD environment“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5-8), S. 1731–1741. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9128-9>.

(Jaspers & Dautzenberg 2002)

Jaspers, S. & Dautzenberg, J. (2002), „Material behaviour in metal cutting: strains,

strain rates and temperatures in chip formation“, *Journal of Materials Processing Technology*, 121(1), S. 123–135. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01227-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01227-4).

(Kalitsios et al. 2022)

Kalitsios, G.; Lazaridis, L.; Psaltis, A.; Axenopoulos, A. & Daras, P. (2022), „Vision-Enhanced System For Human-Robot Disassembly Factory Cells: Introducing A New Screw Dataset“. *2022 4th International Conference on Robotics and Computer Vision (ICRCV)*, Wuhan, China, S. 204–208.
<https://doi.org/10.1109/ICRCV55858.2022.9953178>.

(Kampker et al. 2020)

Kampker, A.; Wessel, S.; Fiedler, F. & Maltoni, F. (2020), „Battery pack remanufacturing process up to cell level with sorting and repurposing of battery cells“, *Journal of Remanufacturing*, S. 1–23. <https://doi.org/10.1007/s13243-020-00088-6>.

(Kampker et al. 2018)

Kampker, A.; Vallée, D. & Schnettler, A. (Hrsg.) (2018), *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-662-53137-2.

(Kampker 2014)

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

(Karim et al. 2018)

Karim, A.; Corcione, E.; Jager, J. & Verl, A. (2018), „Experimental determination of compliance values for a machining robot“. *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Auckland, New Zealand, S. 1311–1316. <https://doi.org/10.1109/AIM.2018.8452434>.

(Karlsson & Järrhed 2000)

Karlsson, B. & Järrhed, J.-O. (2000), „Recycling of electrical motors by automatic disassembly“, *Measurement Science and Technology*, 11(4), S. 350–357.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/4/303>.

(Katz et al. 2007)

Katz, S.; Tal, A. & Basri, R. (2007), „Direct visibility of point sets“, *ACM Transactions on Graphics*, 26(3), S. 24. <https://doi.org/10.1145/1276377.1276407>.

(Kernbaum et al. 2009)

Kernbaum, S.; Franke, C. & Seliger, G. (2009), „Flat screen monitor disassembly and testing for remanufacturing“, *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(3), S. 347. <https://doi.org/10.1504/IJSM.2009.023979>.

(Keshavarzi et al. 2022)

Keshavarzi, M. M.; Gilaki, M. & Sahraei, E. (2022), „Characterization of in-situ material properties of pouch lithium-ion batteries in tension from three-point bending tests“, *International Journal of Mechanical Sciences*, 219, S. 107090. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107090>.

(Kim et al. 2022)

Kim, K.; Song, M.-K.; Lee, S.-J.; Shin, D.; Suh, J. & Kim, J.-D. (2022), „Fundamental Study on Underwater Cutting of 50 mm-Thick Stainless Steel Plates Using a Fiber Laser for Nuclear Decommissioning“, *Applied Sciences*, 12(1), S. 495. <https://doi.org/10.3390/app12010495>.

(Klocke 2018)

Klocke, F. (2018), *Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide*, Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 9783662542064.

(Klocke & König 2007)

Klocke, F. & König, W. (2007), *Fertigungsverfahren 3. Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 3-540-23492-6.

(Kopacek & Kopacek 2006)

Kopacek, P. & Kopacek, B. (2006), „Intelligent, flexible disassembly“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(5-6), S. 554–560. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0042-9>.

(Korthauer 2013)

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

(Krauß, M. 2014)

Krauß, M. (2014), *Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

(Kurzweil & Dietlmeier 2015)

Kurzweil, P. & Dietlmeier, O. K. (2015), *Elektrochemische Speicher*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-10899-1.

(Kurzweil & Dietlmeier 2018)

Kurzweil, P. & Dietlmeier, O. (2018), *Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 9783658218287.

(Küstters, K. J. 1956)

Küstters, K. J. (1956), *Temperaturen im Schneidkeil spanender Werkzeuge*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen.

(Kwade 2018)

Kwade, A. (Hrsg.) (2018), *Recycling of Lithium-Ion Batteries. The LithoRec Way*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 978-3-319-70571-2.

(Lee et al. 2003)

Lee, J. H.; Lee, H. M. & Ahn, S. (2003), „Battery dimensional changes occurring during charge/discharge cycles—thin rectangular lithium ion and polymer cells“, *Journal of Power Sources*, 119-121, S. 833–837. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00281-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00281-7).

(Lensch-Franzen et al. 2020)

Lensch-Franzen, C.; Gohl, M.; Schmalz, M. & Doguer, T. (2020), „From Cell to Battery System - Different Cell Formats and their System Integration“, *MTZ world-wide*, 81(11), S. 68–73. <https://doi.org/10.1007/s38313-020-0292-9>.

(Lesemann et al. 2013)

Lesemann, M.; Faßbender, S. & Stein, J. (2013), „Kundenanforderungen an Elektrofahrzeuge“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 115(11), S. 868–873. <https://doi.org/10.1007/s35148-013-0302-1>.

(Li et al. 2014)

Li, J.; Barwood, M. & Rahimifard, S. (2014), „An automated approach for disassembly and recycling of Electric Vehicle components“. *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, Florence, Italy, S. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IEVC.2014.7056158>.

(LI et al. 2008)

LI, H.-F.; GAO, J.-K. & ZHANG, S.-L. (2008), „Effect of Overdischarge on Swelling and Recharge Performance of Lithium Ion Cells“, *Chinese Journal of Chemistry*, 26(9), S. 1585–1588. <https://doi.org/10.1002/cjoc.200890286>.

(Link et al. 2022)

Link, S.; Neef, C.; Wicke, T.; Hettesheimer, T.; Diehl, M.; Krätzig, O.; Degen, F.; Klein, F.; Fanz, P.; Burgard, M. & Kleinert, R. (2022), *Development perspectives for lithium-ion battery cell formats*. <https://doi.org/10.24406/PUBLICA-1321>.

(Lisbona & Snee 2011)

Lisbona, D. & Snee, T. (2011), „A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries“, *Process Safety and Environmental Protection*, 89(6), S. 434–442. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.06.022>.

(Liu 2021)

Liu, S. (2021), *3D Point Cloud Analysis. Traditional, Deep Learning, and Explainable Machine Learning Methods*, Springer International Publishing AG, Cham. ISBN: 9783030891800.

(Lutters 2018)

Lutters, E. (2018), „Computer-Aided Design“. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, S. 1–3. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_6443-4.

(Maier 2019)

Maier, H. (2019), *Grundlagen der Robotik*, VDE Verlag, Berlin, Offenbach. ISBN: 9783800750719.

(Mangold et al. 2022)

Mangold, S.; Steiner, C.; Friedmann, M. & Fleischer, J. (2022), „Vision-Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing“, *Procedia CIRP*, 105, S. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.001>.

(Markowski et al. 2014)

Markowski, J.; Narra, S.; Ay, P.; Pempel, H. & Müller, M. (2014), *Automatic disassembly and recycling of lithium-traction-accumulators*.

(Möller, C. 2019)

Möller, C. (2019), *Entwicklung eines hochgenauen Bearbeitungsroboters durch*

den Einsatz zusätzlicher Messtechnik. Dissertation, Technische Universität Hamburg.

(Nave, M. 2003)

Nave, M. (2003), *Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen*. Dissertation, Universität Dortmund.

(Nocedal & Wright 2006)

Nocedal, J. & Wright, S. J. (2006), *Numerical optimization*, Springer, New York, NY. ISBN: 0-387-30303-0.

(Oh et al. 2014)

Oh, K.-Y.; Siegel, J. B.; Secondo, L.; Kim, S. U.; Samad, N. A.; Qin, J.; Anderson, D.; Garikipati, K.; Knobloch, A.; Epureanu, B. I.; Monroe, C. W. & Stefanopoulou, A. (2014), „Rate dependence of swelling in lithium-ion cells“, *Journal of Power Sources*, 267, S. 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.05.039>.

(Ostermann 2014)

Ostermann, F. (2014), *Anwendungstechnologie Aluminium*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-43806-0.

(Paucksch et al. 2008)

Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M. & Tikal, F. (2008), *Zerspantechnik. Prozesse, Werkzeuge, Technologien*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-0279-8.

(Perović 2009)

Perović, B. (2009), *Spanende Werkzeugmaschinen. Ausführungsformen und Vergleichstabellen*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-540-89951-8.

(Poschmann et al. 2021)

Poschmann, H.; Brüggemann, H. & Goldmann, D. (2021), „Fostering End-of-Life Utilization by Information-driven Robotic Disassembly“, *Procedia CIRP*, 98, S. 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.104>.

(Pott & Dietz 2019)

Pott, A. & Dietz, T. (2019), „Standardroboterwerkzeuge und Endeffektoren“. *Industrielle Robotersysteme. Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen*, S. 35–49. https://doi.org/10.1007/978-3-658-25345-5_3.

(Prioli et al. 2022)

Prioli, J. P. J.; Alrufaifi, H. M. & Rickli, J. L. (2022), „Disassembly assessment from CAD-based collision evaluation for sequence planning“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78, S. 102416.

<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102416>.

(Pryor et al. 2008)

Pryor, L.; Schlobohm, R. & Brownell, B. (2008), *A Comparison of Aluminum vs. Copper as Used in Electrical Equipment*.

(Puzik, A. 2011)

Puzik, A. (2011), *Genauigkeitssteigerung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern durch Fehlerkompensation mit 3D-Piezo-Ausgleichsaktorik*. Dissertation, Universität Stuttgart.

(Rallo et al. 2020)

Rallo, H.; Benveniste, G.; Gestoso, I. & Amante, B. (2020), „Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries“, *Resources, Conservation and Recycling*, 159, S. 104785.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104785>.

(Richa et al. 2014)

Richa, K.; Babbitt, C. W.; Gaustad, G. & Wang, X. (2014), „A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles“, *Resources, Conservation and Recycling*, 83, S. 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.008>.

(Rieger et al. 2016)

Rieger, B.; Schlueter, S.; Erhard, S. V.; Schmalz, J.; Reinhart, G. & Jossen, A. (2016), „Multi-scale investigation of thickness changes in a commercial pouch type lithium-ion battery“, *Journal of Energy Storage*, 6, S. 213–221.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2016.01.006>.

(Rösch, O. 2014)

Rösch, O. (2014), *Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern*. Dissertation, Technische Universität München.

(Rosenberg et al. 2022)

Rosenberg, S.; Huster, S.; Baazouzi, S.; Glöser-Chahoud, S.; Al Assadi, A. &

Schultmann, F. (2022), „Field Study and Multimethod Analysis of an EV Battery System Disassembly“, *Energies*, 15(15), S. 5324.

<https://doi.org/10.3390/en15155324>.

(Rusu et al. 2009)

Rusu, R. B.; Blodow, N. & Beetz, M. (2009), „Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D registration“. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, S. 3212–3217. <https://doi.org/10.1109/robot.2009.5152473>.

(Sackewitz 2014)

Sackewitz, M. (Hrsg.) (2014), *Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik*, Fraunhofer-Verl., Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0761-9.

(Sauerteig, D. 2018)

Sauerteig, D. (2018), *Implementierung und Parametrierung eines physikalischen Simulationsmodells einer Lithium-Ionen Zelle zur Analyse elektrochemisch-mechanischer Wechselwirkungen*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau.

(Schäfer et al. 2020)

Schäfer, J.; Singer, R.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2020), „Challenges and Solutions of Automated Disassembly and Condition-Based Remanufacturing of Lithium-Ion Battery Modules for a Circular Economy“, *Procedia Manufacturing*, 43, S. 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.145>.

(Schmitt et al. 2011)

Schmitt, J.; Haupt, H.; Kurrat, M. & Raatz, A. (2011), „Disassembly automation for lithium-ion battery systems using a flexible gripper“. *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Tallinn, Estonia, S. 291–297. <https://doi.org/10.1109/ICAR.2011.6088599>.

(Shan et al. 2007)

Shan, H.; Li, S.; Huang, J.; Gao, Z. & Li, W. (2007), „Ant Colony Optimization Algorithm-Based Disassembly Sequence Planning“. *2007 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Harbin, China, S. 867–872. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303659>.

(Siciliano 2009)

Siciliano, B. (2009), *Robotics. Modelling, Planning and Control*, Springer London, London. ISBN: 978-1-84628-641-4.

(Siciliano & Khatib 2016)

Siciliano, B. & Khatib, O. (Hrsg.) (2016), *Springer handbook of robotics*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-319-32552-1.

(SIEMENS 2022)

SIEMENS (01/2022), *SINUMERIK ONE Run MyRobot /Direct Control. Programmierhandbuch*. <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/de/view/109807753> [26.02.2024].

(SIEMENS 2024)

SIEMENS (01/2024), *SINUMERIK ONE NC-Programmierung. Programmierhandbuch*. <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/de/view/109925763> [26.02.2024].

(Stübler & Meir 2019)

Stübler, R. & Meir, B. (2019), *Ökologisch und ökonomisch hergestellte Lithium-Ionen-Batterien für "Batterie 2020" (Oekobat-2020) - Second-Life-Konzept in stationären Batteriespeicheranwendungen : Schlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2016 bis 31.12.2018 (kostenneutral verlängert bis 30.06.2019)*. <https://doi.org/10.2314/KXP:1693116332>.

(Tam et al. 2013)

Tam, G. K. L.; Cheng, Z.-Q.; Lai, Y.-K.; Langbein, F. C.; Liu, Y.; Marshall, D.; Martin, R. R.; Sun, X.-F. & Rosin, P. L. (2013), „Registration of 3D point clouds and meshes: a survey from rigid to nonrigid“, *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 19(7), S. 1199–1217. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.310>.

(Tang 2009)

Tang, Y. (2009), „Learning-Based Disassembly Process Planner for Uncertainty Management“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 39(1), S. 134–143. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2008.2007990>.

(Tönshoff 2010)

Tönshoff, H. K. (Hrsg.) (2010), *Massivumformteile wirtschaftlich spanen*, Infostelle Industrieverb. Massivumformung, Hagen. ISBN: 978-3-928726-23-8.

(Torres et al. 2009)

Torres, F.; Puente, S. & Díaz, C. (2009), „Automatic cooperative disassembly robotic system: Task planner to distribute tasks among robots“, *Control Engineering Practice*, 17(1), S. 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2008.05.013>.

(Tran et al. 2023)

Tran, T. A.; Njåstad, E. B.; Midling, O. T.; Bjelland, M. & Lobov, A. (2023), „Generation of rule-adhering robot programs for aluminium welding automatically from CAD“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(3-4), S. 1175–1187. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10996-z>.

(Tsai & Lenz 1989)

Tsai, R. Y. & Lenz, R. K. (1989), „A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(3), S. 345–358. <https://doi.org/10.1109/70.34770>.

(Uchiyama et al. 1999)

Uchiyama, Y.; Fujisawa, R.; Oda, Y. & Hirasawa, E. (1999), „Air conditioner and washing machine primary disassembly process“. *1999 First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan, S. 258–262. <https://doi.org/10.1109/ECODIM.1999.747619>.

(Uhlmann et al. 2001)

Uhlmann, E.; Spur, G. & Elbing, F. (2001), „Development of flexible automatic disassembly processes and cleaning technologies for the recycling of consumer goods“. *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001)*, Fukuoka, Japan, S. 442–446. <https://doi.org/10.1109/ISATP.2001.929074>.

(United Nations Environment Programme 2014)

United Nations Environment Programme (2014), *UNEP 2013 Annual Report*. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8607> [29.02.2024].

(Vajna et al. 2009)

Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H. & Zeman, K. (2009), *CAX für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540360384.

(VDI 2343-3)

VDI 2343-3 (2009), *VDI 2343-3:2009-04, Recycling elektrischer und elektronischer Geräte - Demontage*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(Vongbunyong & Chen 2015)

Vongbunyong, S. & Chen, W. H. (Hrsg.) (2015), *Disassembly automation. Automated systems with cognitive abilities*, Springer, Cham. ISBN: 978-3-319-15182-3.

(Vyas & Rickli 2016)

Vyas, P. & Rickli, J. L. (2016), „Automatic Extraction and Synthesis of Disassembly Information From CAD Assembly STEP File“, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. <https://doi.org/10.1115/DETC2016-59577>.

(Wang et al. 2020)

Wang, B.; Hu, S. J.; Sun, L. & Freiheit, T. (2020), „Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives“, *Journal of Manufacturing Systems*, 56, S. 373–391. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020>.

(Warner 2015)

Warner, J. (2015), *The handbook of lithium-ion battery pack design. Chemistry, components, types and terminology*, Elsevier Science, Amsterdam. ISBN: 978-0-12-801456-1.

(Weber 2019)

Weber, W. (2019), *Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung*, Hanser, München. ISBN: 9783446459526.

(Wegener et al. 2015)

Wegener, K.; Chen, W. H.; Dietrich, F.; Dröder, K. & Kara, S. (2015), „Robot Assisted Disassembly for the Recycling of Electric Vehicle Batteries“, *Procedia CIRP*, 29, S. 716–721. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.051>.

(Wegener et al. 2014)

Wegener, K.; Andrew, S.; Raatz, A.; Dröder, K. & Herrmann, C. (2014), „Disassembly of Electric Vehicle Batteries Using the Example of the Audi Q5 Hybrid System“, *Procedia CIRP*, 23, S. 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.098>.

(Whitney 1969)

Whitney, D. (1969), „Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses“, *IEEE Transactions on Man Machine Systems*, 10(2), S. 47–53.
<https://doi.org/10.1109/TMMS.1969.299896>.

(Wollnack, J. 2001)

Wollnack, J. (2001), *Videometrische Verfahren zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Habilitation.

(Xie et al. 2014)

Xie, Z.; Wang, X. & Chi, S. (2014), „Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of structured-light sensors“, *Optics and Lasers in Engineering*, 58, S. 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.01.001>.

(Xu et al. 2008)

Xu, J.; Thomas, H. R.; Francis, R. W.; Lum, K. R.; Wang, J. & Liang, B. (2008), „A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries“, *Journal of Power Sources*, 177(2), S. 512–527.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.074>.

(Yang et al. 2021)

Yang, H.; Shi, J. & Carlone, L. (2021), „TEASER: Fast and Certifiable Point Cloud Registration“, *IEEE Transactions on Robotics*, 37(2), S. 314–333.
<https://doi.org/10.1109/TRO.2020.3033695>.

(Yi et al. 2008)

Yi, J.; Yu, B.; Du, L.; Li, C. & Hu, D. (2008), „Research on the selectable disassembly strategy of mechanical parts based on the generalized CAD model“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(5-6), S. 599–604. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-0990-3>.

(Zahedi et al. 2016)

Zahedi, H.; Mascle, C. & Baptiste, P. (2016), „A quantitative evaluation model to measure the disassembly difficulty; application of the semi-destructive methods in aviation End-of-Life“, *International Journal of Production Research*, 54(12), S. 3736–3748. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1165877>.

(Zhang et al. 2018a)

Zhang, J.; Zhang, L.; Sun, F. & Wang, Z. (2018), „An Overview on Thermal Safety

Issues of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Application“, *IEEE Access*, 6, S. 23848–23863. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2824838>.

(Zhang et al. 2018b)

Zhang, X.; Li, L.; Fan, E.; Xue, Q.; Bian, Y.; Wu, F. & Chen, R. (2018), „Toward sustainable and systematic recycling of spent rechargeable batteries“, *Chemical Society reviews*, 47(19), S. 7239–7302. <https://doi.org/10.1039/c8cs00297e>.

(Zhu et al. 2019)

Zhu, K.; Gong, L.; Gu, D. & Liu, C. (2019), „An Analytic Calibration Method for Turntable-Based 3D Scanning System“. *2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Hong Kong, China, S. 495–500. <https://doi.org/10.1109/aim.2019.8868360>.

(Zorn et al. 2022)

Zorn, M.; Ionescu, C.; Klohs, D.; Zähl, K.; Kisseler, N.; Daldrup, A.; Hams, S.; Zheng, Y.; Offermanns, C.; Flamme, S.; Henke, C.; Kampker, A. & Friedrich, B. (2022), „An Approach for Automated Disassembly of Lithium-Ion Battery Packs and High-Quality Recycling Using Computer Vision, Labeling, and Material Characterization“, *Recycling*, 7(4), S. 48. <https://doi.org/10.3390/recycling7040048>.

(ZSW 2023)

ZSW (2023), *Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos weltweit von 2012 bis 2022*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/406683/umfrage/anzahl-der-verkaeufe-von-elektroautos-weltweit-prognose/> [14.02.2024].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1–1: Anzahl an neu zugelassenen Elektroautos weltweit bis 2022 in Anlehnung an (ZSW 2023)	1
Abbildung 1–2: Prognose des jährlichen Absatzes von Personenkraftwagen weltweit nach Antrieb bis 2040 in Anlehnung an (ABB Group 2021)	2
Abbildung 2–1: Hierarchischer Aufbau von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (Kampker 2014)	5
Abbildung 2–2: Beispielhafter Aufbau eines Batteriemoduls mit prismatischen Zellen in Anlehnung an (Fleischer et al. 2021)	6
Abbildung 2–3: Prozesskette bei der Demontage von Batteriemodulen	15
Abbildung 2–4: Mögliche Trennverfahren für mechanische, unlösbare Fügeverbindungen	20
Abbildung 2–5: Physischer Aufbau eines flexiblen Demontagesystems in Anlehnung an (Fleischer et al. 2021)	28
Abbildung 2–6: Visualisierung des Funktionsprinzips bei einer 3D-Kamera mit Streifenlichtprojektion in Anlehnung an (Beyerer et al. 2016)	37
Abbildung 2–7: Visualisierung des Funktionsprinzips bei der Triangulation	38
Abbildung 2–8: Darstellung der Koordinatensysteme in der Robotik in Anlehnung an (Maier 2019)	41
Abbildung 3–1: Essenzielle Schritte für das automatisierte und flexible Trennen der Zellkontaktierungen	47
Abbildung 3–2: Vorgehensweise zur Erfüllung der Zielstellung	48
Abbildung 4–1: Visualisierung der geometrischen Kennwerte von prismatischen Zellen	51
Abbildung 4–2: Morphologischer Kasten für Batteriemodule mit prismatischen Zellen angelehnt an (Gerlitz et al. 2021a)	52
Abbildung 4–3: Beispielhafte Darstellung von ein- und zweireihigen Batteriemodulen	53

Abbildung 4–4: Visualisierung der geometrischen Kennwerte von Busbars in Anlehnung an (A_Auer & Biller 2022)	55
Abbildung 4–5: Veranschaulichung der akkumulierten Dickenänderung bei Lithium-Ionen-Batterien in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)	56
Abbildung 4–6: Ursache-Wirkungskette der Gefahren und Auswirkungen bei Lithium-Ionen-Batterien in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2022)	59
Abbildung 4–7: Beispielhafte Illustration des kritischen Abstands <i>akrit</i>	61
Abbildung 4–8: Aufbau einer Zellkontaktierung und Darstellung der möglichen Lösungsalternativen	62
Abbildung 4–9: Planfräsverfahren in Anlehnung an (Klocke 2018)	65
Abbildung 4–10: Veranschaulichung der ausgewählten Kombination aus Trennstrategie und Trennprozess	66
Abbildung 4–11: Subsysteme zum Trennen der Zellkontaktierungen in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)	69
Abbildung 5–1: Elementare Koordinatensysteme in der flexiblen Demontageanlage in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)	71
Abbildung 5–2: Bezugssysteme <i>KOSCAM</i> und <i>KOSTT</i> in Anlehnung an (Zhu et al. 2019)	72
Abbildung 5–3: Aufnahme des Schachbrettmusters für die (links) Grob-Registrierung und (rechts) Fein-Registrierung in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)	73
Abbildung 5–4: Montiertes ZIVID-Schachbrett (links) an den Spannbacken zur Kalibrierung des Drehtisch-KOS und (rechts) am Roboterflansch zur Kalibrierung des Roboterbasis-KOS	75
Abbildung 5–5: 3D-Verarbeitungspipeline für die Punktlokalisierung in Anlehnung an (Gerlitz et al. 2023a)	76
Abbildung 5–6: Exemplarische Darstellung (links) der sphärischen Spiegelung der blauen Punktwolke sowie (rechts) der Rückprojektion der konvexen Hülle in Anlehnung an (Katz et al. 2007)	78
Abbildung 5–7: Bestimmung der sechs Sichtpunkte mithilfe der quaderförmigen Bounding-Box um das Referenzmodell in Anlehnung an (A_Enslin 2022)	79

Abbildung 5–8: Punktwolke des Referenzmodells vor (links) und nach (rechts) der Anwendung von Hidden Point Removal	80
Abbildung 5–9: Variation der Kameraaufnahmen und resultierende Gesamtaufnahmequalität in Anlehnung an (A_Enslin 2022)	82
Abbildung 5–10: (links) Zusammengefügte Gesamtaufnahme ohne Transformation der einzelnen Punktwolken, (rechts) erfolgreich zusammengefügte 3D-Aufnahme eines Batteriemoduls (A_Enslin 2022; Gerlitz et al. 2023a)	84
Abbildung 5–11: Exemplarische Darstellung der Punktlokalisierung an vier Beispielpunkten in Anlehnung an (A_Enslin 2022; Gerlitz et al. 2023a)	87
Abbildung 5–12: Versuchsaufbau für die Validierung der Verarbeitungspipeline mit Batteriemodul 1 in Anlehnung an (A_Enslin 2022)	88
Abbildung 5–13: (links) Batteriemodul 1 und (rechts) Batteriemodul 2	89
Abbildung 6–1: Prüfstand für Prozessuntersuchungen in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	99
Abbildung 6–2: Versuchsaufbau, bestehend aus montierten Opferblechen auf Adapterplatte und Kraftmessplatte	100
Abbildung 6–3: Aufgebrachtes Isolier- und Kaptonband (links) zur Wärmeisolation auf der Adapterplatte und eingebrachte Senkbohrungen (rechts) als Befestigungspositionen für die Thermoelemente (A_Zöller 2023)	101
Abbildung 6–4: Drei Phasen der Versuchsdurchführung	101
Abbildung 6–5: Kategorisierung der Trennschnitte: (links) 1, (Mitte) 2 und (rechts) 3 (A_Zöller 2023)	103
Abbildung 6–6: Trennschnitt der Kategorie 3 mit spät einsetzender Wirrspannbildung in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	104
Abbildung 6–7: Parameterfeld bei Werkzeugdurchmesser 4 mm in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	105
Abbildung 6–8: Parameterfeld bei Werkzeugdurchmesser 6 mm in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	105
Abbildung 6–9: Parameterfeld bei Werkzeugdurchmesser 8 mm in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	106

Abbildung 6–10: Ungefilterter und geglätteter Kraftverlauf in y-Richtung in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	108
Abbildung 6–11: Signalverläufe der Temperaturen an den Sensoren 1, 2, 3 und 4 in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	109
Abbildung 6–12: Späne unter Mikroskop: (oben) Bröckelspäne [d8v4f10a2,5], (Mitte) kurze Wendelspäne [d8v6f50a1,5], (unten) Wendelspanstücke [d8v6f200a1,5]) in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	110
Abbildung 6–13: Spezifische Schnittkraft in Abhängigkeit des Zahnvorschubs für alle drei Schnittgeschwindigkeiten in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	113
Abbildung 6–14: Spezifische Vorschubkraft in Abhängigkeit des Zahnvorschubs für alle drei Schnittgeschwindigkeiten in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	113
Abbildung 6–15: Gemessene Maximaltemperaturen an der kritischen Position in Abhängigkeit des Zahnvorschubs sowie Schnittgeschwindigkeiten in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	115
Abbildung 6–16: Trennschnitt bei instabilen Prozessparametern mit überhöhten Temperaturen (A_Zöller 2023)	116
Abbildung 6–17: Maximale, kritische Spanlängen in Abhängigkeit des Zahnvorschubs in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	117
Abbildung 6–18: Mittlere und maximale, kritische Spanlängen in Abhängigkeit des Werkzeugdurchmessers in Anlehnung an (A_Zöller 2023)	118
Abbildung 6–19: Definition des drehbaren Batteriemodul-Quaders	120
Abbildung 6–20: Prozentualer Anteil der erreichbaren Punkte p_{access} im betrachteten Untersuchungsvolumen für verschiedene θ_{TCP} und θ_7	123
Abbildung 6–21: Exemplarische Darstellung der erreichbaren Punkte für drei unterschiedliche Betriebspunkte	124
Abbildung 6–22: Erreichbare TCP-Bahngeschwindigkeiten v_{max} für verschiedene Punkte im Untersuchungsvolumen, wobei (links) alle Punkte erreichbar sind und keine Singularitäten vorliegen, (Mitte) Singularitätsnähe vorliegt, (rechts) Singularitätsnähe und nicht erreichbare Punkte vorliegen	128
Abbildung 6–23: Maximal erreichbare Konstant-Bahngeschwindigkeiten in y-Richtung, bezogen auf das gesamte Untersuchungsvolumen	129

Abbildung 6–24: Maximale, prozesskraftbedingte Werkzeugbahnverschiebung für verschiedene Betriebspunkte in (a) x-Richtung, (b) y-Richtung sowie (c) z-Richtung	131
Abbildung 7–1: Übersicht der Verarbeitungspipeline für das automatisierte und flexible Trennen der Zellkontaktierungen	134
Abbildung 7–2: Werkstück-Koordinatensystem <i>KOSOBJ</i> angelehnt an (A_Richter 2023)	136
Abbildung 7–3: Fräsbahn (rot markiert) mit den vier Stützpunkten an einer Busbar angelehnt an (A_Richter 2023)	137
Abbildung 7–4: Minimal umgebendes Schnittrechteck an einer Busbar angelehnt an (A_Richter 2023)	139
Abbildung 7–5: Fräspfade zum Trennen der Zellkontaktierungen an einem Batteriemodul (A_Richter 2023)	140
Abbildung 7–6: Optimierung bei der Fräsbahnfindung als Traveling Salesman-Problem	145
Abbildung 7–7: Beide optimalen Muster für die Busbar-Reihenfolge	146
Abbildung 7–8: 2D-Optimierungsraum für fixe Busbar-Reihenfolge/Fräsrichtungen, (oben) Seitenansicht, (unten) Draufsicht mit Bereichen (1), (2), (3)	149
Abbildung 7–9: Gemessene Laufzeiten sowie Optimierungswerte für die drei Optimierungsverfahren	151
Abbildung 7–10: Integrierte Gesamtpipeline inklusive Übergabeparameter	153
Abbildung 8–1: Implementierte Roboterzelle als Validierungsprüfstand	156
Abbildung 8–2: (links) Konstruktiver Aufbau des Dummy-Batteriemoduls, (rechts) eingespanntes Modul im Spannsystem	157
Abbildung 8–3: Bahnabweichung beim Trennen der Zellkontaktierung	160
Abbildung 8–4: Versuchsdurchführung mit schwarzem Lackstift für die Markierung der Frässchnitte	161
Abbildung 8–5: Dummy-Batteriemodul nach dem Markierungsversuch: (links) B1, (rechts) B3*	162

Abbildung 8–6: Bahnabweichungen (Mittelwert und Standardabweichung) bei verschiedenen Markierungsversuchen in Abhängigkeit des Busbarindex	162
Abbildung 8–7: Bahnabweichungen (Mittelwert und Standardabweichung) mit kamerabasierter Verformungskompensation bei induzierter, gesamter Moduldickenänderung von (links) +0 mm, (Mitte) +7 mm, (rechts) +14 mm	163
Abbildung 8–8: Wendelspanstücke aus dem Validierungsversuch mit Millimeter-Messskala als Maßstab	165
Abbildung 8–9: Erfolgreiche Trennschnitte beim Dummy-Batteriemodul mit acht Zellen (vorher und nachher)	165
Abbildung 8–10: Erfolgreiche Trennschnitte beim Dummy-Batteriemodul mit zehn Zellen (vorher und nachher)	166
Abbildung 8–11: Fräsen der 1. Zellkontaktierung	166
Abbildung 8–12: Fräsen der 2. Zellkontaktierung	167
Abbildung 8–13: Fräsen der letzten Zellkontaktierung	167
Abbildung 8–14: Simulierte und gemessene Gesamtdauern bei nicht-optimierten und optimierten Parameterkombinationen	169

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der drei Zelltypen in Anlehnung an (Kampker 2014) (Bildquelle: (Gerlitz et al. 2021a))	7
Tabelle 2-2: Forschungsarbeiten zum Thema Demontage von Traktionsbatterien	12
Tabelle 2-3: Forschungsarbeiten mit Einsatz von zerstörenden Trennverfahren bei der Demontage	24
Tabelle 2-4: Forschungsarbeiten mit umgesetzten flexiblen Demontagesystemen	29
Tabelle 2-5: Nutzwertanalyse der vier wichtigsten Industrieroboter in Anlehnung an (Pott & Dietz 2019)	30
Tabelle 2-6: Ausschnitt von marktverfügbaren 3D-Streifenlichtprojektionskameras	38
Tabelle 4-1: Geometrische Kennwerte und Wertebereich bei prismatischen Zellen	51
Tabelle 4-2: Eingesetzte Werkstoffe für Busbars in Anlehnung an (Das et al. 2019)	55
Tabelle 4-3: Geometrische Kennwerte von Busbars	55
Tabelle 4-4: Relative Dickenschwankungen bei prismatischen Lithium-Ionen-Zellen	57
Tabelle 4-5: Beispielrechnung zur Abschätzung der Dickenschwankungen	58
Tabelle 4-6: Übersicht maximaler Grenztemperaturen aus verschiedenen Quellen	61
Tabelle 4-7: Gegenüberstellung der möglichen Trennstrategien	63
Tabelle 4-8: Anforderungen an das Demontagesystem, unterteilt in Kinematik/Spannsystem (K), Werkzeug (T) sowie Kamerasystem (C)	67
Tabelle 4-9: Technische Subsysteme und Modellbezeichnung	69
Tabelle 5-1: Übersicht über die elementaren Koordinatensysteme	71
Tabelle 5-2: Hyperparameter in BCPD++ in Anlehnung an (A_Enslin 2022)	86
Tabelle 5-3: Eingesetzte Batteriemodul und deren Eigenschaften	89

Tabelle 5-4: Ermittelte Laufzeiten und Genauigkeiten für Batteriemodul 1 und 2 in Anlehnung an (A_Enslin 2022; Gerlitz et al. 2023a)	92
Tabelle 6-1: Eingegrenzte Prozessparameter beim Schaftfräsen	94
Tabelle 6-2: Maximale Schnittgeschwindigkeiten für verschiedene Werkzeugdurchmesser bei maximaler Spindeldrehzahl $n_{max} = 24.000 \text{ U/min}$	97
Tabelle 6-3: Spezifikation für den ausgewählten Fräser	98
Tabelle 6-4: Spezifikation der technischen Systeme für die Prozessuntersuchungen	102
Tabelle 6-5: Versuchsplanung zur Parametereingrenzung	104
Tabelle 6-6: Versuchsplanung zur Absicherung hinsichtlich kritischer, produktbezogener Größen	107
Tabelle 6-7: Mögliche Einflussfaktoren auf die Kraftmodellierung	112
Tabelle 6-8: Angenäherte Kienzle-Parameter für die Schnittkraft und Vorschubkraft	112
Tabelle 6-9: Geometrische Grenzwerte für den definierten Batteriemodul-Quader	120
Tabelle 6-10: Variable, geometrische Prozessparameter	120
Tabelle 6-11: Diskretisierte Werte für die Erreichbarkeitsanalyse	122
Tabelle 6-12: Diskretisierte Werte für die Geschwindigkeitsanalyse	127
Tabelle 6-13: Diskretisierte Werte für die Analyse der prozesskraftbedingten Werkzeugbahnverschiebung	130
Tabelle 7-1: Verschiedene Arten der Einzelbewegung	142
Tabelle 7-2: Genutzte NC-Befehle in der SINUMERIK One (SIEMENS 2022; SIEMENS 2024)	142
Tabelle 7-3: Berechnungsvorschriften für die Zeitdauer	144
Tabelle 7-4: Auflistung der Optimierungsvariablen	144
Tabelle 7-5: Acht mögliche, optimale Varianten in codierter Form für die Busbar-Reihenfolge sowie Fräsrichtungen	147
Tabelle 7-6: Übersicht der Hyperparameter für die drei Optimierungsverfahren	151

Tabelle 7-7: Darstellung der Übergabeparameter	154
Tabelle 8-1: Technische Spezifikation des Dummy-Batteriemoduls	158
Tabelle 8-2: Versuchsplan für die Markierungsversuche	161
Tabelle 8-3: Simulierte und gemessene Gesamtdauern bei nicht-optimierten und optimierten Parameterkombinationen	169
Tabelle 9-1: Weiterverwendung der Teilsysteme in weiteren Anwendungsfällen	175

Anhang

10.1 Anlagen- und Roboterparameter

COMAU NJ290-3.0 Denavit-Hartenberg-Parameter

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	0	1,140	0,460	$+\pi/2$
2	$+\pi/2$	0	1,050	$+\pi$
3	$+\pi/2$	0	0,250	$-\pi/2$
4	0	1,510	0	$-\pi/2$
5	0	0	0	$+\pi/2$
6	0	0,282	0	0

COMAU NJ290-3.0 Torsionssteifigkeiten (konservativ geschätzt) und Grenzwinkelgeschwindigkeiten

Achse	Torsionssteifigkeiten [Nm/arcmin]	Grenzwinkelgeschwindigkeiten [°/sec]
1	11636	88,8
2	2327	88,8
3	1164	88,8
4	204	103,8
5	291	105
6	4363	159,6

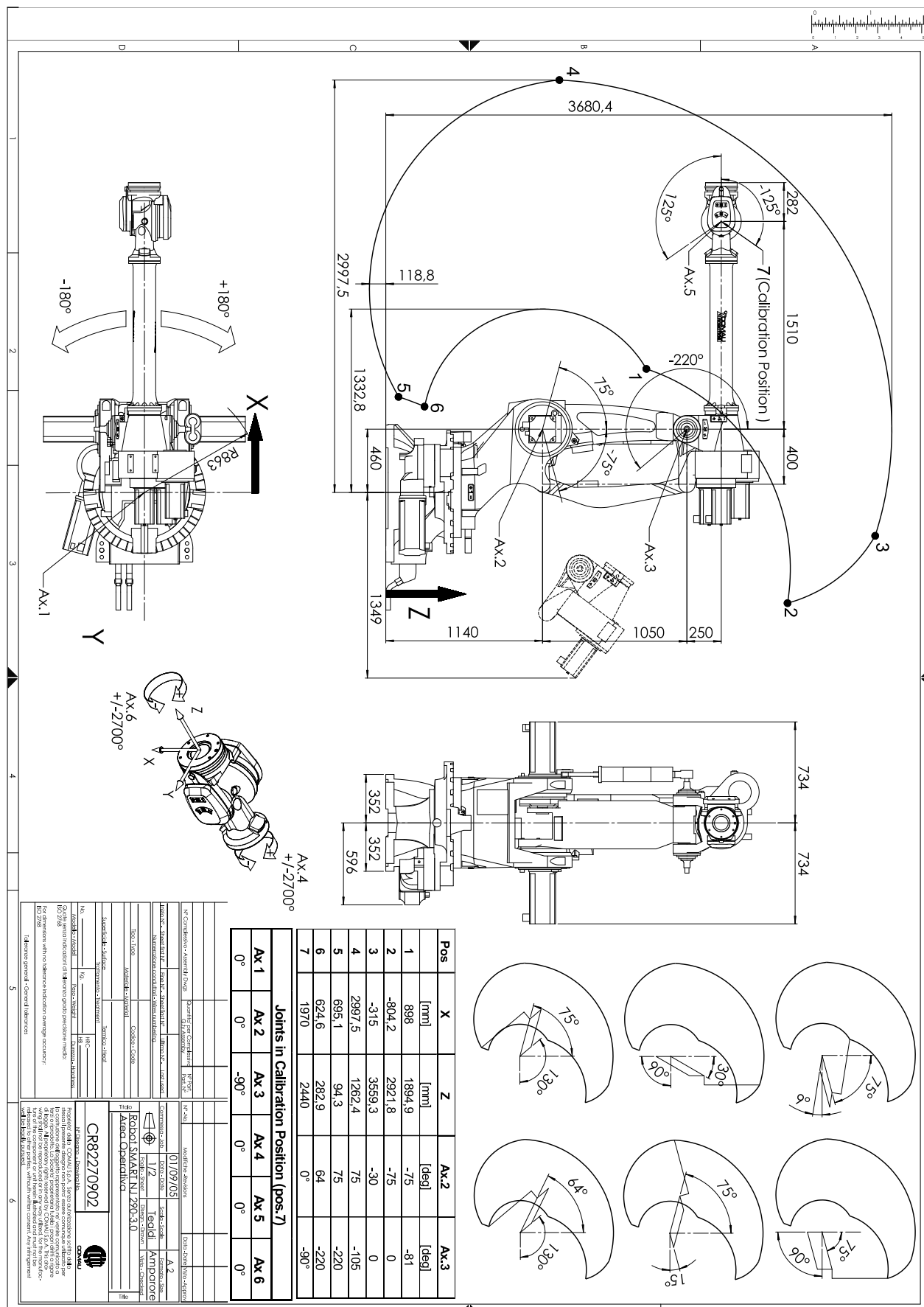
*Transformationsmatrix
Roboterbasis \rightarrow Drehtisch*

$M_{TT}^{ROB}: KOS_{ROB} \rightarrow KOS_{TT}$			
	-1		2,125
1			-1,210
		1	1,032
			1

*Transformationsmatrix
Roboterflansch \rightarrow Werkzeugspitze*

$M_{TCP}^{EE}: KOS_{EE} \rightarrow KOS_{TCP}$			
		-1	-0,206
	1		0
1			0,315
			1

10.2 Datenblatt COMAU NJ290-3.0



10.3 Datenblatt ZIVID Two

General specifications

Model (Part number)	Zivid Two (ZVD2)
3D technology	Structured light
Imaging	1944 x 1200 (2.3 MP) Native 3D Color
Point cloud output	3D (XYZ) + Color (RGB) + SNR
Exposure time (minimum per pattern projection)	1.677 ms
Aperture (A)	f/1.8 to f/32
Gain (G)	1x to 16x
Projector Brightness (B)	0.25x to 1.8x 1x = 360 lumens
Calibration	Factory calibrated
Safety and EMC	CE CB EN62368 FCC Class B
Typical capture time ¹	80 ms to 1 s

¹From capture initialized until point cloud is ready to copy. Includes processing. Acquisition time can be shorter.

Operating distance and field of view

Focus distance (mm)	700
Optimal working distance (mm)	500 to 1100
Recommended working distance (mm)	300 to 1500
Field of view (mm)	754 x 449 at 700
Spatial resolution (mm)	0.39 at 700 5.6 × 10 ⁻⁴ per distance (z) in mm

FIGURE 1 - SPATIAL RESOLUTION VS. DISTANCE

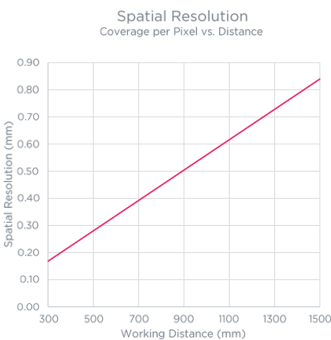


FIGURE 2 - FIELD OF VIEW
All values in degrees or mm.

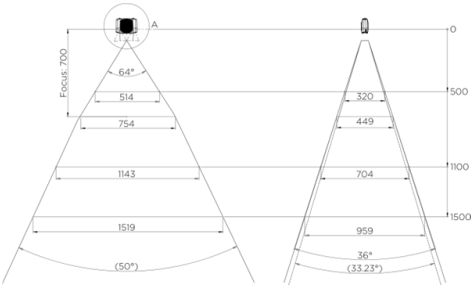


FIGURE 3 - OPTICAL ANGLES AND BASELINE
All values in degrees or mm.

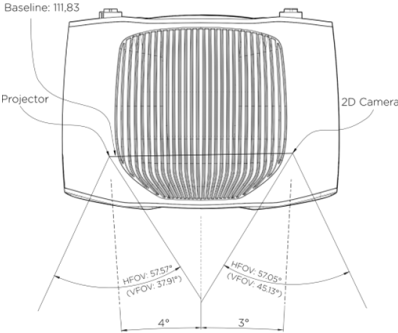
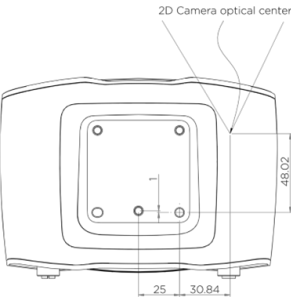


FIGURE 4 - OPTICAL CENTER POSITION RELATIVE TO MOUNTING HOLES
All values in degrees or mm.



Accuracy specifications

Common conditions

The following table outlines the conditions applied under test and to all specifications unless otherwise stated.

Parameter	Description	Typical
Working distance (D)	Focus distance	700 mm
	Optimal working distance	500 - 1100 mm
Ambient temperature (Ta)	Typical temperature	15 - 30 °C
	Full temperature range	0 - 40 °C
Ambient light (La)		0 lux
Aperture (A)		f/8.0 - f/2.0
Gain (G)		1.0x
Projector Brightness (B)		1 - 1.8 x
Capture time	Acquisition time used during measurement	> 60 ms
	Capture time used during measurement	> 100 ms
Duty Cycle	Capture-to-idle time ratio	5 - 30 %
Other		8% center crop (90% × 90%)
		HDR = off
		10 min warm-up
		Applied in-field correction

1.0 - 05/21

7

ZVID.COM

Typical specifications

Typical numbers are given at common conditions unless otherwise specified.

Property	Description	Typical
Warm-up time	Minimum recommended time needed for camera to stabilize from an idle state assuming capturing at a constant rate. Some trueness changes may be experienced during warm-up phase.	10 minutes
Point precision	1σ Euclidian distance variation for a point between consecutive measurements at focus distance, D. ²	55 μm
Local Planarity Precision	1σ Euclidian distance variation from a plane for a set of points within a smaller local region at focus distance, D. ²	75 μm
Global Planarity Trueness	Average deviation from a plane in field of view at focus distance, D.	< 160 μm
Dimension Trueness	70-percentile dimension error in field of view at focus distance, D, and typical temperature range.	< 0.20 %
	70-percentile dimension error in field of view within optimal working distance and typical temperature range.	< 0.30 %
	70-percentile dimension error in field of view within optimal working distance and full temperature range.	< 0.40 %

² Measured with Gaussian filter disabled.

1.0 - 05/21

8

ZVID.COM

FIGURE 5 - POINT PRECISION VS. DISTANCE AND AMBIENT LIGHT

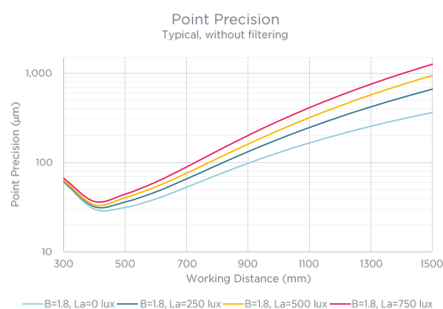
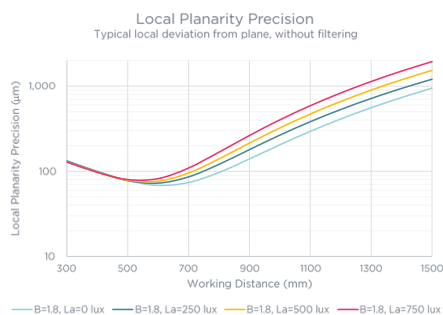


FIGURE 6 - LOCAL PLANARITY PRECISION VS. DISTANCE



1.0 - 05/21

9

ZVID.COM

FIGURE 7 - GLOBAL PLANARITY TRUENESS VS. DISTANCE

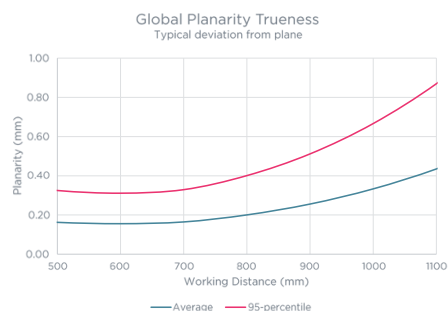
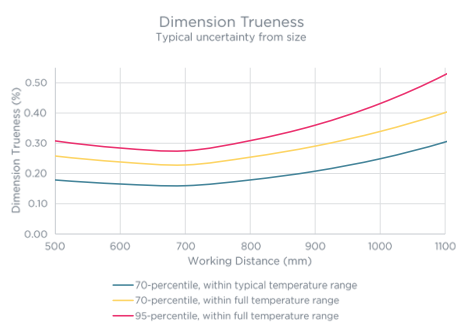


FIGURE 8 - DIMENSION TRUENESS VS. DISTANCE



1.0 - 05/21

10

ZVID.COM

ITEM NO.	DESCRIPTION	UNIT	QTY
1	TOOL INTERFACE: HSK-F63 D169893-6	PC	1
2	WERKZEUGSPANNUNG: HSK-F63 DIN69893-6	PC	1
3	TOOL INTERFACE: HSK-F63 D169893-6	PC	1
4	WERKZEUGSPANNUNG: HSK-F63 DIN69893-6	PC	1
5	TOOL INTERFACE: HSK-F63 D169893-6	PC	1
6	WERKZEUGSPANNUNG: HSK-F63 DIN69893-6	PC	1
7	TOOL INTERFACE: HSK-F63 D169893-6	PC	1
8	WERKZEUGSPANNUNG: HSK-F63 DIN69893-6	PC	1

10.5 Datenblatt Garant VHM-Fräser

Datenblatt Hoffmann Group

Garant

VHM-Fräser DIN 6535 HA, DLC, Ø DC: 8mm



Bestelldaten

Bestellnummer	201270 8
GTIN	4045197586087
Artikelklasse	11X

Beschreibung

Ausführung:

Stabile Schneidkanten.
Baumaße ähnlich DIN 6527.
Mit **DLC-Beschichtung sp³** der neuesten Generation.
Innenkühlung: nein
Toleranz Nenn-Ø: e8
Zähnezahl Z: 2
Spiralwinkel: 45 Grad
Zustellrichtung: horizontal, schräg und vertikal
Schaft: DIN 6535 HA mit h6
Zähnezahl Z: 2
Schneidenlänge L_s: 19 mm
Ausraglänge L, inkl. Freistellung: 26 mm
Freistellungs-Ø D_f: 7,7 mm
Gesamtlänge L: 63 mm
Schaft-Ø D_s: 8 mm

Technische Beschreibung

Vorschub f _p für Nutenfräsen in Alu kurzspanend	0,03 mm
Schneiden-Ø D _c	8 mm
Vorschub f _p für Besäumen in Alu kurzspanend	0,04 mm
Freistellungs-Ø D _f	7,7 mm
Eckenfasenbreite bei 45°	0,1 mm

© Hoffmann GmbH Qualitätswerkzeuge

09.01.2023 21:05

1/3

Datenblatt Hoffmann Group

Ausraglänge L, inkl. Freistellung	26 mm
Zähnezahl Z	2
Schaft-Ø D _s	8 mm
Gesamtlänge L	63 mm
Schneidenlänge L _s	19 mm
Zustellrichtung	horizontal, schräg und vertikal
Schaft	DIN 6535 HA mit h6
Toleranz Nenn-Ø	e8
Spiralwinkel	45 Grad
Eckenfasenwinkel	45 Grad
Beschichtung	DLC
Schneidstoff	VHM
Norm	DIN 6527
Typ	W
Eingriffsbreite a _e bei Fräsoption	Vollnut Schnitttiefe 1xD
Eingriffsbreite a _e bei Fräsoption	0,5xD bei Besäumen
Innenkühlung	nein
Farbring	gelb
Produktart	Eckfräser

Anwenderdaten

	Eignung	V _c	ISO-Code
Alu	geeignet	480 m/min	N
Alu (kurzspanend)	geeignet	440 m/min	N
Alu > 10% Si	geeignet	400 m/min	N
PMMA Acryl	geeignet	200 m/min	N
PE-HD	geeignet	160 m/min	N
PA 66	geeignet	200 m/min	N
PEEK	geeignet	150 m/min	N

© Hoffmann GmbH Qualitätswerkzeuge

09.01.2023 21:05

2/3

Datenblatt Hoffmann Group

PF 31	geeignet	130 m/min	N
PVDF GF20	geeignet	180 m/min	N
POM GF25	geeignet	160 m/min	N
PA 66 GF30	geeignet	150 m/min	N
PEEK GF30	geeignet	130 m/min	N
PTFE CF25	geeignet	160 m/min	N
Honeycomb Sandwich	bedingt geeignet	300 m/min	N
Cu	geeignet	160 m/min	N
CuZn	geeignet	200 m/min	N
nass maximal	geeignet		
nass minimal	geeignet		
trocken	bedingt geeignet		
Luft	geeignet		

Dienstleistungen

Schaftfreistellen Typ FRST	209900 FRST
Schaftschleifen Typ HB	129100 HB

© Hoffmann GmbH Qualitätswerkzeuge

09.01.2023 21:05

3/3

10.6 Datenblatt VARTA-Zelle



LPP 402025 CE Rechargeable Lithium-Ion Pouch

Data Sheet¹

	Type Designation	LPP 402025 CE
	Type Number	56416
	System	Li-Ion
	UL Recognition	UL 1642
	Nominal Voltage [V]	3.7 (average)
	Typical capacity [mAh]	150 (at C/5 from 4.2 V to 2.75 V at 20°C)
	Minimum capacity C [mAh]	140 (at C/5 from 4.2 V to 2.75 V at 20°C)
	Dimensions [mm]	
	Length (l)	25 +/-0.5 (without Tabs)
	Width (w)	20 +/-0.5
	Height (h)	4.0 +/-0.3
	Weight, approx. [g]	3.7
	Charging Method	Constant current + Constant voltage
	Charge Voltage [V]	4.20 (+/- 50 mV)
	Initial charge current [mA]	Standard Charge: 70 Rapid Charge: 140
	Charging cut-off (a) or b))	
	a) by time [h]	Standard Charge: 3 Rapid Charge: 2.5
	b) by min. current [mA]	C/50
	Discharge cut-off voltage [V]	3.0
	Max. Continuous Discharge Current [mA]	280
	Operating temperature [°C]	Charge: 0 to 45 Discharge: -20 to 60
	Storage Temperature	6 Month at -20 to +45°C
	Impedance initial [mΩ]	<180 @ 1kHz
	Life expectancy 20°C [Cycles]	300 cycles 1C/1C >80% of minimum capacity

¹ Prior to use read Handling Precaution and Prohibitions for VARTA Li-Ion Batteries

Subject to change without prior notice !

10.7 Datenblatt CATL-Zelle

	PRODUCT SPECIFICATION	DOC NO.: <u>CTPS-S5E891-13</u> REV. : <u>1.0</u> SHEET : <u>6</u> of <u>15</u>
---	----------------------------------	--

测量单位	“V” (Volt)伏特(V)，电压单位 “A” (Ampere)安培(A)，电流单位 “Ah” (Ampere-Hour)安培-小时(Ah)，负荷单位 “Wh” (Watt-Hour)瓦特-小时(Wh)，能量单位 “Ω” (Ohm) 欧姆(Ω)，电阻单位 “mΩ” (Milliohm) 毫欧姆(mΩ)，电阻单位 “°C” (degree Celsius) 摄氏度(°C)，温度单位 “mm” (millimetre) 毫米(mm)，长度单位 “s” (second) 秒(s)，时间单位 “Hz” (Hertz)赫兹(Hz)，频率单位
------	--

适用范围

本规格书描述了 CATL 生产的 3.65V 48Ah (CATL PN:FC-N48-S5E891-5AEL)可充电三元体系动力电池的性能指标、使用条件以及风险警示。

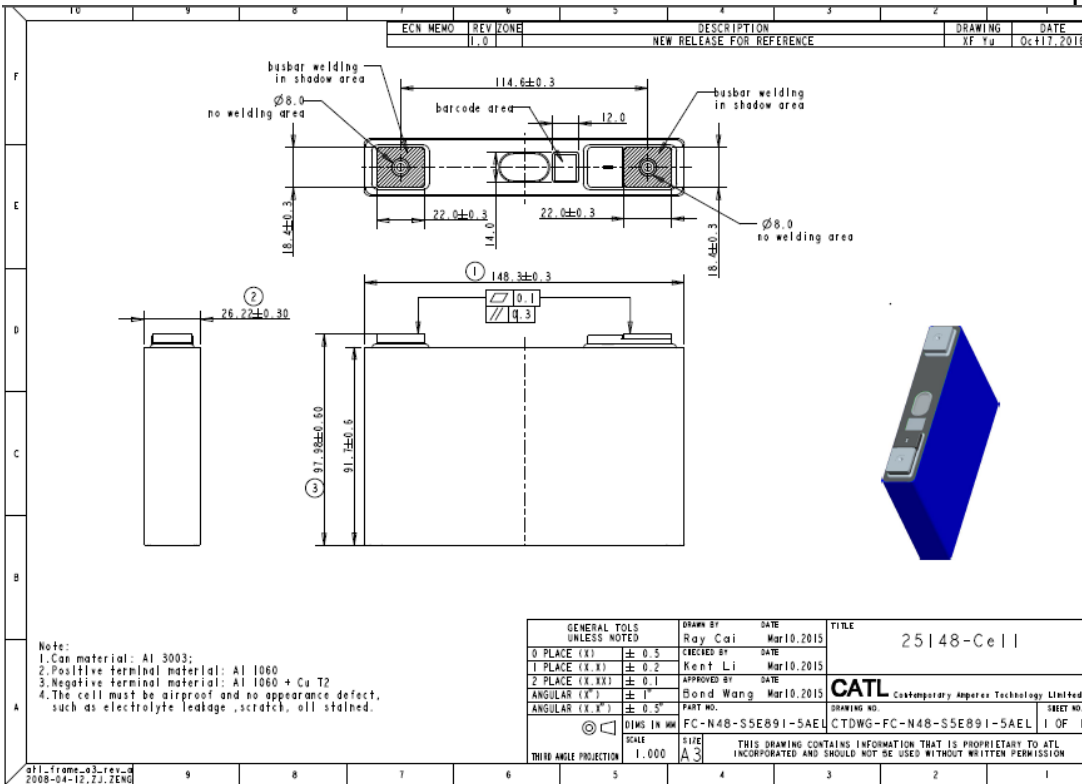
产品电性能指标

2.1 概要

No.	参数	产品规格	条件
2.1.1	标准容量	$\geq 50\text{Ah}$ $\geq 48\text{Ah}$	16A(0.33C)电流放电电流 48A(1.0C)电流放电
2.1.2	放电能量	$\geq 182.5\text{ Wh}$ $\geq 172.8\text{ Wh}$	16A(0.33C)电流放电电流 48A(1.0C)电流放电
2.1.3	额定电压	3.65V 3.60V	16A(0.33C)电流放电电流 48A(1.0C)电流放电
2.1.4	工作电压范围	2.8–4.2V 2.5–4.2V 2.1–4.2V	温度 $T > -5^{\circ}\text{C}$ $-25^{\circ}\text{C} \leq \text{温度} T \leq 5^{\circ}\text{C}$ 温度 $T \leq -25^{\circ}\text{C}$
2.1.5	电池内阻(1KHz)	$\leq 1.0\text{m}\Omega$	新电池 70%SOC 状态
2.1.6	电池平均内阻(1KHz)	$\sim 0.65\text{m}\Omega$	新电池 70%SOC 状态
2.1.7	出货容量	$\sim 70\%$ 的充电状态	3.78–3.84V
2.1.8	工作温度(充电)	$-20 - 55^{\circ}\text{C}$	参考第 2.2 节
2.1.9	工作温度(放电)	$-30 - 55^{\circ}\text{C}$	参考第 2.3 节
2.1.10	存储温度	$-40 - 55^{\circ}\text{C}$	
2.1.11	循环寿命	≥ 1500 循环	$25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，24A 充电/48A 放电，容量衰

	PRODUCT SPECIFICATION	DOC NO.: CTPS-S5E891-13
		REV. : 1.0
		SHEET : 14 of 15

9. 电芯图纸



注：上图尺寸为传统包膜（侧边包膜），非 U 型包膜尺寸

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

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

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

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die Axialkolbenmaschine

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung von Quantisierungseffekten

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an Industrierobotern

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

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

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozessessteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

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

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

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

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

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

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsigen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

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

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

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

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

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

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

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

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

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

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

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

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

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

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

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

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

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

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

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

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

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

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

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

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

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

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

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

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

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

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. WirtschaftsIng. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

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

Band 84

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

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

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

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

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

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

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossman

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitäts-
methodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

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

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünfsachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlen-
unterstützte CAM-Umgebung**

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

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

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

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

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmäzle

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

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

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

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser
Abrasivstrahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

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

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

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

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

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

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von 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 Unsicherheit der
Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

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

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

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

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

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

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight
production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

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

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

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

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

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

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

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

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

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

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

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

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

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

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

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

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

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

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

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

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning

Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

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

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

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

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

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

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

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

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

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

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

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

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

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

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

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

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

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

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

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

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

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

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

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

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

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

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

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

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

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönnerheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

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

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

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

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

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

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Band 289

Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

Prozessgeregelte Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren

Band 290

Dr.-Ing. Patrizia Konstanze Gartner

Konzept eines Selbstheilungsmechanismus für Polymerelektrolytmembranen

Optimierung der Lebensdauer und der Effizienz von Brennstoffzellen

Band 291

Dr.-Ing. Jens Schäfer

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

Band 292

Dr.-Ing. Gwen Louis Steier

Strategischer Fit in globalen Produktionsnetzwerken

Entscheidungsunterstützung für die strategische Netzwerkkonfiguration

Band 293

Dr.-Ing. Louis Schäfer

Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung:

Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 294

Dr.-Ing. Jan-Philipp Kaiser

Autonomous View Planning using Reinforcement Learning

Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Band 295

Dr.-Ing. Wilken Wößner

Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 296

Dr.-Ing. Ann-Kathrin Wurba

Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von Batterieelektroden

Band 297

Dr.-Ing. Simon Mangold

Automatisierte Demontage von Schraubverbindungen für das Remanufacturing

Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle

Band 298

Dr.-Ing. Eduard Gerlitz

Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen in Lithium-Ionen-Batteriemodulen

Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen Demontage von Traktionsbatterien

