

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

Jens Schäfer

**Funktionsintegriertes Handhabungssystem
zur geometrieflexiblen, positionsgenauen
Einzellagenstapelung in
der Brennstoffzellenstackfertigung**

Band 291



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

Jens Schäfer

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

Band 291

Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung

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

Jens Schäfer

Tag der mündlichen Prüfung: 09.09.2024

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2024

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 978-3-8440-9920-1

PDF-ISBN 978-3-8191-0007-9

ISSN 2944-6430

eISSN 2944-6449

<https://doi.org/10.2370/9783819100079>

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 Akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner Arbeit als Hauptreferent, die offenen Diskussionen sowie der Ermöglichung meines abschließenden Aufenthalts an der Tongji Universität Shanghai. Darüber hinaus gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz mein Dank zur Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Weiterer Dank gilt Prof. Dr. Junying Min für die Ermöglichung des Forschungsaustauschs mit der Tongji Universität sowie die Unterstützung, die ich vor Ort erfahren habe.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen möchte ich mich für die stets konstruktive Zusammenarbeit, die Arbeitsatmosphäre und das gemeinsam Erlebte bedanken. Mein Dank gilt ebenfalls den wissenschaftlichen Hilfskräften und Abschlussarbeitern, die durch ihre Vorarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen Eltern danke ich insbesondere für die Förderung und Unterstützung, die ich erfahren habe. Dadurch war mir das Studium und die Erstellung dieser Arbeit erst möglich.

Abschließend gilt mein tiefster Dank meiner Frau Claudia, die mir bei der Anfertigung der Arbeit stets den notwendigen Rückhalt gegeben hat.

Schwetzingen, im September 2024

Jens Schäfer

Abstract

This work consists of an empirical study on achievable accuracies in fuel cell stack manufacturing and the qualification of a novel gripper system with integrated position measurement for a function-oriented alignment of bipolar plates.

Based on an extensive study on the current state of the art tolerances in fuel cell stacking, which show an influence on fuel cell performance, are identified. Further constraints such as prior production processes to fuel cell stacking are considered within the evaluation.

Based on that the gripping of individual components is further investigated. A large-area vacuum gripper is built and characterized. An experimental setup is presented, which makes the measurement of position deviations after grasping and releasing possible. With this setup catalyst coated membranes (CCM), gas diffusion layers (GDL), membrane-electrode-assemblies (MEA) and bipolar plates are further investigated. Parameters such as the distance when grasping and releasing the component are varied. Recommendations for accurate grasping of components are derived from the experimental results.

A novel gripper is developed for the bipolar plate, which allows for a position measurement whilst grasping. Two cameras are integrated into the gripper. An approach is developed, that is based on phase cross correlation of images, therefore conducting the calculation in the frequency domain. With adaptations being made the algorithm is optimized and qualified by a reference measurement system.

The gripper is then mounted onto an industrial robot. With insufficient position accuracy of the components prior to grasping (standard deviation of $\sigma = 0,25$ mm in both directions in-plane) a positioning with a standard deviation of $\sigma < 12$ μ m is achieved. The quantified tolerances for the complete system are finally being evaluated to conclude prioritization for precise component handling during assembly.

Zusammenfassung

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine empirische Untersuchung erzielbarer Genauigkeiten in der Brennstoffzellenstackfertigung sowie der Qualifikation eines neuartigen Systems zur funktionsorientierten Ausrichtung der Bipolarplatte.

Aus einer umfangreichen Recherche des Stands der Technik werden funktionsrelevante Toleranzen und deren Auswirkung für das Produkt Brennstoffzelle identifiziert. Neben dem Stapelprozess werden dabei auch vorgelagerte Prozessschritte berücksichtigt. Weiterhin wird beleuchtet, welche Randbedingungen das Produkt dabei stellt.

Aufbauend darauf wird der Greifvorgang näher untersucht. Ein Flächengreifer wird hierzu charakterisiert und anschließend qualifiziert. Ein Versuchsaufbau, der dazu in der Lage ist, Positionsabweichungen während des Greif- und Ablagevorgangs zu quantifizieren, wird vorgestellt. Mit diesem Versuchsaufbau wird anschließend die Handhabung der Bauteile Catalyst Coated Membrane (CCM), Gasdiffusionslage (GDL), Membrane-Electrode-Assembly (MEA) und Bipolarplatte untersucht. Einzelne Parameter, beispielsweise Abstände während des Greifens und Ablegens, werden dabei variiert. Es wird eine Empfehlung zu einer möglichst positionsgetreuen Ablage der Bauteile abgeleitet.

Für die Bipolarplatte wird ein Greifer entwickelt, der dazu in der Lage ist, die Position des Bauteils während des Greifens zu bestimmen. Hierfür sind zwei Kameras in das Greifsystem integriert. Anhand des erzeugten Bildes wird anschließend eine Verarbeitung durchgeführt, um Positionsverschiebungen detektieren zu können. Dabei wird ein Ansatz erarbeitet, der auf einer Phase Cross Correlation und damit einer Auswertung im Frequenzbereich beruht. Durch Anpassungen wird der Auswertealgorithmus weiter optimiert und anhand von Referenzmessungen qualifiziert.

Anschließend wird der Greifer an einem Industrieroboter montiert. Dabei wird bei einer unzureichenden Bereitstellungsgenauigkeit mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,25 \text{ mm}$ in beide Ebenenrichtungen eine Positionierung mit einer Standardabweichung von $\sigma < 12 \mu\text{m}$ erzielt. Zuletzt werden die quantifizierten Toleranzen bewertet, um daraus Priorisierungen für präzise Montagevorgänge ableiten zu können.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
Formelverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Funktionsweise einer Brennstoffzelle	3
2.2 Komponenten einer Brennstoffzelle	7
2.2.1 Bipolarplatte	7
2.2.2 Gas Diffusion Layer	8
2.2.3 Catalyst Coated Membrane	9
2.2.4 Membrane-Electrode-Assembly (MEA)	10
2.3 Konstruktionsvarianten	11
2.4 Prozesskette der Brennstoffzellenherstellung	12
2.4.1 Bipolarplatte	13
2.4.2 Dichtung	17
2.4.3 Membrane-Electrode-Assembly	18
2.4.4 Stack	20
2.5 End of Line Prüfungen	22
2.6 Handhabungstechnik	23
2.6.1 Bauteilspektrum	23
2.6.2 Bauteilanalyse: Effect of Defects	26
2.6.3 Umsetzungsformen einzelner Funktionsträger	32
2.6.4 Umsetzungsformen in anderen Branchen	41
2.7 Bewertung des Stands der Technik und Forschung	45
3 Zielstellung und Vorgehensweise	47

3.1	Zielstellung	47
3.2	Vorgehensweise	49
4	Planungsphase	52
4.1	Anforderungsanalyse	53
4.2	Funktionsanalyse und Gesamtsystementwurf	54
4.3	Lösungsprinzipien	58
4.3.1	Teilfunktion Greifen	59
4.3.2	Teilfunktion Position und Orientierung bestimmen	60
4.3.3	Teilfunktion Bewegen	62
4.4	Schnittstellendefinition	63
5	Ermittlung prozesseitiger Einflussfaktoren	66
5.1	Versuchsaufbau	67
5.2	Absichern der Anforderungserfüllung	71
5.3	CCM	76
5.4	GDL	83
5.5	7-Lagen-MEA	86
5.6	Bipolarplatte	93
5.7	Bewertung	100
6	Umsetzung eines sensorischen Greifers	101
6.1	Modifizierter Greifer mit integrierter Bilderfassung	101
6.2	Versuchsaufbau	106
6.3	Gesamtversuchsaufbau	118
6.4	Bewertung	130
7	Gesamtsystem	132
8	Zusammenfassung und Ausblick	134
8.1	Zusammenfassung	134
8.2	Ausblick	135

Tabellenverzeichnis	IV
Literaturverzeichnis	VI
Anhang	XXXIII

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
ANOVA	Analysis of Variance
BPP	Bipolarplatte
CCM	Catalyst Coated Membrane
CVD	Chemical Vapour Deposition
CVM	Cell Voltage Monitoring
GDE	Gas Diffusion Electrode
GDL	Gasdiffusionslage
MAX-Phase	Carbide oder Nitride im stöchiometrischen Verhältnis $M_{n+1}AX_n$
MD	Machine Direction
MEA	Membrane-Electrode-Assembly
MEFA	Membrane Electrode Frame Assembly
MEGA	Membrane Electrode Gasket Assembly
MPL	Micro Porous Layer
PCC	Phase Cross Correlation
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition
PEM	Polymer Electrolyte Membrane, Proton Exchange Membrane
PnP	Perspective-n-Point
PVD	Physical Vapour Deposition
RH	Relative Luftfeuchte
ROI	Region of Interest
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SURF	Speeded up Robust Features
TCP	Transmission Control Protocol
TD	Transverse Direction

Formelverzeichnis

Abkürzung	Größe	Einheit
a_{ab}	Abstand zwischen Geifer mit Bauteil und dem Ablageort	[m]
a_{auf}	Abstand zwischen Greifer und Bauteil während der Aufnahme	[m]
a_{cam}	Pixelgröße der Kamera	[m]
a_{obj}	Abbildungsgröße eines Pixels	[m]
d_{cam}	Abstand der Bildmittelpunkte zweier Kameras	[m]
f	Brennweite der Kamera	[m]
f	Freiheitsgrad in einer Varianzanalyse	
F	Fisher-Wert (Quantil der F-Verteilung)	[\cdot]
$f_{1,2}$	Diskrete Fourier-Transformation eines Bildes	[\cdot]
F_2	Streuungsfehler	[\cdot]
$IK_{n,m}$	Rücktransformation des Kreuzleistungsspektrums	[\cdot]
$K_{n,m}$	Kreuzleistungsspektrum	[\cdot]
p	Prozent-Bedeutung eines Faktors	[\cdot]
p_1	Versorgungsluftdruck des Greifers	[bar]
p_2	Versorgungsluftdruck des Vakuumtischs	[bar]
P_{Ablage}	Nennposition während der Bauteilablage	[m,m,m]
$P_{Aufnahme}$	Nennposition während der Bauteilaufnahme	[m,m,m]
P_{Korr}	Korrekturwerte der Bauteilablage	[m,m,rad]
R	Rotationsmatrix	[rad]
SQ	Quadratsummen in einer ANOVA	[m^2]
SQ'	Absolute Streuungsanteile in einer ANOVA	[m^2]
T	Translationsmatrix	[m^2]
t_{Mess}	Triggerzeitpunkt zur Auslösung einer Messung	[s]
V	Schätzwert der Faktorvarianz	[m^2]
X_{corr1}	Linearer x-Korrekturfaktor	[\cdot]

Abkürzung	Größe	Einheit
x_{corr2}	Differenz zwischen dem Mittelpunkt der Messpunkte und dem Bauteilmittelpunkt in x	[m]
X_m, Y_m	Mittelpunkt der Punktewolke	
y_{corr1}	Linearer y-Korrekturfaktor	[-]
y_{corr2}	Differenz zwischen dem Mittelpunkt der Messpunkte und dem Bauteilmittelpunkt in y	[m]
β_{corr}	Linearer Winkelkorrekturfaktor	[-]
σ_{abs}	Absolute Standardabweichung der euklidischen Distanz	[m]
σ_{abs}	Prozessfähigkeitsindex	[-]
σ_x, σ_y	Standardabweichungen in die Raumrichtung x,y	[m]

1 Einleitung

1.1 Motivation

69 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland basierte 2022 auf importierten Energieträgern wie Mineralöl, Erdgas oder Steinkohle (Buttermann 2023). Durch die politischen Ziele der Energiewende bedarf es eines alternativen Energieträgers, der den Anforderungen an Speicherbarkeit und Transportierbarkeit bisheriger Energieträger genügt (BMWi 2020).

Wasserstoff bietet die Möglichkeit, Energie über größere Entfernungen zu transportieren und über längere Zeiträume zu speichern. Wird dieser Wasserstoff als sogenannter grüner Wasserstoff nachhaltig erzeugt, bietet sich die Möglichkeit fossile Energieträger zu substituieren und die Dekarbonisierung zahlreicher Sektoren zu erreichen. Brennstoffzellen erlauben dabei die Umwandlung der chemischen Energie in Strom. Einsatzgebiete von Brennstoffzellen können in der netzunabhängigen Stromversorgung oder im Mobilitätssektor liegen.

Mit zunehmendem Angebot an Wasserstoff wird in der Folge auch ein nachfrageseitiger Markt für Brennstoffzellen stimuliert, so dass steigende Produktionszahlen zu erwarten sind. Dabei befindet sich die Brennstoffzelle, trotz zahlreicher Demonstrationsprojekte in der Vergangenheit, weiterhin in einem frühen Produktentwicklungsstadium, wobei der Fokus zunehmend auf einer Industrialisierung liegt. Eine der Herausforderungen der Brennstoffzelle liegt in der starken Interaktion zwischen Produktdesign, elektrischer Leistungsfähigkeit und dem Produktionssystem.

Bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung werden wesentliche Merkmale festgelegt, die einen großen Einfluss auf die spätere Assemblierbarkeit und damit die Qualität des Produktes haben können. Aus diesem Grund ist die Kenntnis um mögliche Implikationen für den Produktionsprozess bereits zu einem frühen Zeitpunkt erforderlich. Ein volatiles und fragmentiertes Marktumfeld erfordert Lösungen in der Produktionstechnik, die möglichst flexibel auf verschiedene Kundendesigns anpassbar sind. Dies betrifft insbesondere das sogenannte Stacking, bei dem bis zu 400 galvanische Zellen mit hoher Präzision aufeinandergestapelt werden müssen.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist es, die wesentlichen Einflussfaktoren in der Interaktion zwischen den Bauteilen eines Brennstoffzellenstacks und dem Produktionssystem zu identifizieren, zu beschreiben und anhand eines Produktes zu quantifizieren. Besonderer Fokus der Arbeit liegt dabei auf dem Stapelprozess zur Herstellung eines Brennstoffzellenstacks. Notwendige Maschinenkomponenten sollen so entworfen werden, dass diese eine hohe Flexibilität hinsichtlich des zu verarbeitenden Produktes aufweisen.

Um die wesentlichen Anforderungen an die Produktionstechnik zu identifizieren, wird dazu zunächst der Stand der Technik und Forschung betrachtet. Restriktionen werden identifiziert und derzeitige Defizite werden abgeleitet (Kapitel 2). Aus dem Defizit werden Teilziele abgeleitet (Kapitel 3). Verschiedene Lösungsprinzipien werden ausgearbeitet und in einen Systementwurf überführt (Kapitel 4).

Es wird ein experimentelles Vorgehen entwickelt, mit dem bereits frühzeitig Implikationen eines Produktdesigns auf die Produktion identifiziert werden können. Damit soll der Konflikt aufgelöst werden, dass seitens des Herstellers zwar eine Forderung nach einer zu erreichenden Genauigkeit an den Anlagenbauer gestellt wird, dies jedoch nur in Teilen durch die Maschinentechnik beeinflussbar ist (Kapitel 5).

Mit der Kenntnis dieser Wechselwirkungen wird ein Greifsystem entworfen, das dazu in der Lage ist, ein möglichst breites Bauteilspektrum zu bedienen und gleichzeitig verkürzte Toleranzketten bieten kann (Kapitel 6). Als wesentliches Kriterium soll dabei die erzielbare Genauigkeit betrachtet werden. Dies umschließt sowohl die eigentliche Handhabung als auch Maßnahmen, die zum Ausgleich einer Fehlpositionierung dienen. Im Rahmen einer Toleranzbetrachtung wird das erarbeitete Greifsystem abschließend in die Prozesskette eingeordnet und wesentliche quantifizierte Erkenntnisse werden zusammengefasst (Kapitel 7). Abschließend wird das Potential, das sich aus den Untersuchungen ergibt, in einem Ausblick zusammengefasst (Kapitel 8)

2 Stand der Technik und Forschung

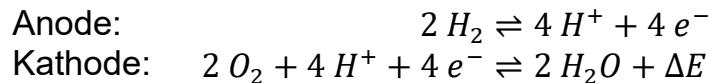
In diesem Kapitel soll zunächst auf die Funktionsweise sowie die wesentlichen Komponenten einer Brennstoffzelle eingegangen werden. Die Komponenten werden dann vor dem Hintergrund verschiedener Konstruktionsvarianten im Aufbau diskutiert. Anschließend wird auf die Implikationen für eine automatisierte Fertigung und Montage der Komponenten eingegangen und die Fertigungsverfahren werden in eine Prozesskette eingeordnet. Einzelne Realisierungsformen der Handhabungstechnik im aktuellen Stand der Technik werden abschließend dargestellt und hinsichtlich identifizierter Restriktionen miteinander verglichen.

2.1 Funktionsweise einer Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle wandelt chemische Energie in elektrische Energie um. Im Gegensatz zur Primär- oder Sekundärbatterie geschieht dies aber unter kontinuierlicher Zuführung der Edukte und Abfuhr der Produkte. Daher werden Brennstoffzellen zum Teil auch als tertiäre Batterien bezeichnet. Dies führt auch dazu, dass eine Brennstoffzelle stets ein offenes und kein hermetisch geschlossenes System darstellt.

Unter den Brennstoffzellen selbst gibt es verschiedene Ausprägungen, die sich durch verwendete Materialien oder Einsatztemperaturen unterscheiden. Aufgrund hoher Dynamik, niedriger Betriebstemperaturen sowie hoher Leistungsdichten findet in Mobilitätsanwendungen vor allem die sogenannte PEM-Brennstoffzelle Anwendung. PEM kann sich dabei sowohl auf die Funktion (*engl. Proton Exchange Membrane*) oder auf den Werkstoff (*engl. Polymer Electrolyte Membrane*) beziehen. Namensgebend ist die Membran aus einem Polymer, das protonenleitend aber elektronenisolierend ist. Eine solche Eigenschaft wird durch spezielle Copolymeren aus Perfluorsulfonsäuren (*engl. Perfluorosulfonic Acid, PFSA*) und Polytetrafluorethylen (PTFE) erzielt. Diese Copolymeren sind zumeist unter den Herstellerbezeichnungen (bspw. Nafion von Chemours) bekannt.

Neben der Membran sind die weiteren Grundelemente einer Brennstoffzelle die sogenannten Gasdiffusionslagen (GDL, *engl. Gas Diffusion Layer*) sowie eine Bipolarplatte (BPP), die eine galvanische Zelle bilden. Aus der elektrochemischen Spanungsreihe ergibt sich bei der dargestellten Reaktion (Formel 2-1) ein Potential von 1,04 V.



Formel 2-1

Bedingt durch ohmsche Verluste sowie Massentransportverluste stellt sich im Betrieb eine Spannung zwischen 0,6 und 0,7 V ein (Daud 2017), das charakteristische Strom-Spannungsverhältnis wird durch die sogenannte Polarisationskurve beschrieben. Für den Einsatz in einem Fahrzeugsystem werden hingegen deutlich höhere Spannungen benötigt, weswegen die einzelnen galvanischen Elemente seriell zu einem Brennstoffzellenstack verschalten werden, der teils auch lediglich als Brennstoffzelle bezeichnet wird.

Abbildung 2-1 zeigt schematisch eine Brennstoffzelle in verschiedenen Integrationsstufen. Links oben dargestellt ist ein Brennstoffzellenstack mit verschiedenen charakteristischen Elementen. Der aktive Bereich (1) beinhaltet die Funktionsträger zur elektrochemischen Energiewandlung. Zur Zu- und Abfuhr von Wasserstoff, Luft und Kühlmittel dient ein sogenanntes Medienmodul (2), in dem dargestellten Fall dient dies ebenfalls als Endplatte. Elektrochemisch aktiver Bestandteil der Luft ist Sauerstoff, nachfolgend wird ausschließlich auf diesen referenziert.

Eine weitere Endplatte ohne zusätzliche Funktion befindet sich an der Unterseite des Stacks (3). Die elektrische Leistung kann über die beiden Stromsammler (4) abgegriffen werden. Sofern Endplatten und Medienmodule elektrisch leitfähig sind, ist darüber hinaus noch ein Isolator vorzusehen. Die Endplatten sind dafür zuständig die von den Spannbändern (5) eingeleiteten Kräfte möglichst homogen zu verteilen. Im aktiven Bereich des Stacks sind die Spannbänder zusätzlich zu isolieren, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Alternativ zu Spannbändern können Gewindestangen verwendet werden. Die Versorgung mit Prozessmedien geschieht über entsprechende Anschlüsse (6). Über diese Anschlüsse werden die Medien Wasserstoff (rot) und Luftsauerstoff (blau) dem aktiven Bereich zugeführt. Detail A zeigt einen entsprechenden Ausschnitt einer sich wiederholenden Einheit aus Membrane-Electrode-Assembly (7) und Bipolarplatte (8), die im Wesentlichen die galvanische Zelle bilden. Dabei wird die MEA von Wasserstoff (hier: Unterseite) und Sauerstoff (hier: Oberseite) umströmt. Die Aussparungen in MEA und Bipolarplatte bilden im Stapel dabei Kanäle, über den sogenannten Portbereich wird die gewünschte Umströmung der MEA durch die Bipolarplatte gewährleistet. Eine ausführliche Diskussion von konstruktiven Realisierungsformen ist in (Stahl 2018, S. 23ff) dargestellt.

Der innere Aufbau kann anhand des Querschnitts A:A verdeutlicht werden, wobei hier zusätzlich eine weitere Bipolarplatte dargestellt ist. Neben den bereits dargestellten Medienflüssen von Wasserstoff und Sauerstoff ist hier ebenfalls die Kühlung dargestellt. Die Kühlung wird zumeist über eine innere Struktur in der Bipolarplatte abgebildet, für die Versorgung ist die Bipolarplatte ebenfalls mit entsprechenden Ports versehen.

Bei der MEA (7) handelt es sich um eine Baugruppe mit mehreren Komponenten, im Wesentlichen Subgasket (10), Gasdiffusionslage (*engl. Gas Diffusion Layer, GDL*) (11) sowie die katalysatorbeschichtete Membran (*engl. Catalyst Coated Membrane, CCM*) (12). Die Dichtung (9) sorgt für eine Trennung der Kavitäten nach außen hin.

Detail B zeigt den chemisch aktiven Bereich der MEA sowie schematisch die beteiligten Reaktionspartner und Elektronenflüsse. Auf der Anodenseite wird das Wasserstoffmolekül am Katalysator (13) in zwei Protonen oxidiert. Diese Protonen können ausschließlich über die protonenleitfähige Membran zur Kathode wandern, die Elektronen (grün) hingegen werden über die elektrisch leitfähigen Fasern der GDL (11) transportiert. Unter Anwesenheit eines Katalysators wird ein Sauerstoffmolekül zusammen mit vier Protonen sowie vier Elektronen zu zwei Wassermolekülen reduziert (vgl. Formel 2-1). Bei anliegender elektrischer Last können die Elektronen nun über einen Verbraucher zur Kathode geführt werden und der Stromkreis wird geschlossen.

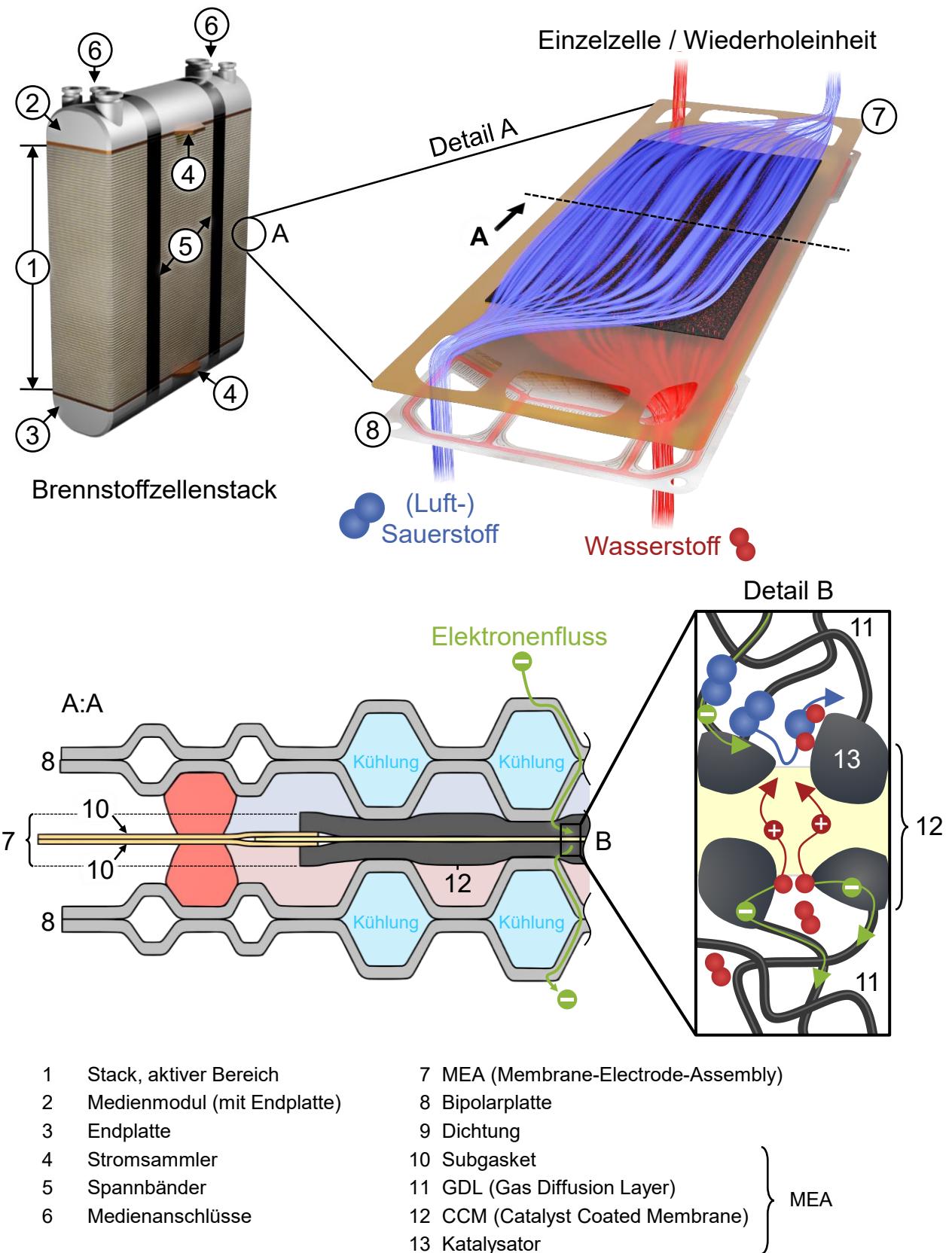


Abbildung 2-1 Aufbau und Funktion einer Brennstoffzelle in verschiedenen Skalen

2.2 Komponenten einer Brennstoffzelle

Ziel des Kapitels ist die Erläuterung der grundlegenden Eigenschaften der verwendeten Bauteile. Zwischen den einzelnen Bauteilen ergeben sich jedoch Abwandlungen in der Konstruktion, auf die in Kapitel 2.3 näher eingegangen wird. Deren industrielle Herstellung wird in Kapitel 2.4 näher beschrieben.

2.2.1 Bipolarplatte

Die Hauptfunktion der Bipolarplatte ist die Verteilung der Edukte und die Abfuhr der Produkte. Weiterhin verbindet sie zwei galvanische Zellen elektrisch miteinander und muss daher stromleitend ausgeführt werden. Über interne Strukturen erfolgt zumeist auch eine Wärmeabfuhr aus dem System durch eine aktive Kühlung in der Kavität zwischen zwei Halbschalen. Abbildung 2-2 zeigt eine metallische Bipolarplatte inklusive der charakteristischen Konstruktionsmerkmale.

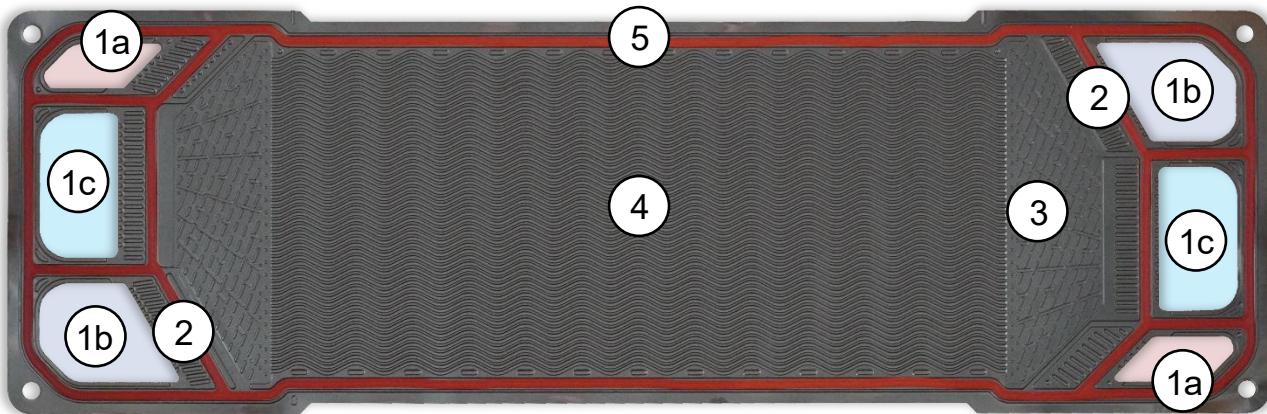


Abbildung 2-2 Bipolarplatte mit charakteristischen Konstruktionsmerkmalen

Für die Zu- und Abfuhr von Wasserstoff (1a), Luft (1b) und Kühlmittel (1c) sind sechs Kanäle, auch als Manifold bezeichnet, notwendig. Dabei ist der Querschnitt des luftführenden Kanals stets größer als der wasserstoffführende. Ursächlich hierfür ist der geringe Volumenanteil von etwa 21 % des elektrochemisch aktiven Sauerstoffs in der verwendeten Luft. Die Prozessmedien werden über die Manifolds durch die sogenannten Ports (2, hier dargestellte Oberseite: Kathode) in die Platte eingeleitet. Über Verteilkanäle (3) werden die Gase dem Flowfield (4) zugeführt, das gleichzeitig den sogenannten aktiven Bereich darstellt. Die Ausgestaltung der Manifolds, der Ports sowie des Flowfields unterscheiden sich zum Teil zwischen den Herstellern. Eine Dichtung (5) verhindert den Gasaustritt. Die Ausgestaltung der Dichtungen

unterscheitet sich ebenfalls zwischen einzelnen Hersteller. Die elektrische Verbindung der Bipolarplatte mit der benachbarten GDL geschieht durch einen Kontaktübergang (vgl. Abbildung 2-1).

Etablierte Werkstoff sind Stähle (1.4301, 1.4404), Titan oder Graphit. Für eine möglichst effiziente Brennstoffzelle ist der dabei entstehende Kontaktwiderstand zu minimieren. Die dazu notwendige Flächenpressung wird durch das elastische Verhalten der GDL und durch Kompression erreicht. Fremdschichtwiderstände der Bipolarplatte, beispielsweise durch Korrosion, senken den Wirkungsgrad. Metallische Werkstoffe müssen daher zusätzlich beschichtet werden.

Um eine Kühlung der Bipolarplatte zu ermöglichen, weist diese in der Regel eine innenliegende Struktur auf, die mit Kühlmittel durchströmt wird. Die innenliegende Struktur entsteht dabei durch das Fügen zweier Bipolarplattenhalbschalen zu einer Bipolarplatteneinheit, im Nachfolgenden kurz als Bipolarplatte (BPP) bezeichnet.

Die Stromleitung zwischen den Bipolarplattenhalbschalen erfolgt im Wesentlichen durch einen Kontaktübergang. Durch eine Beschichtung zwischen den beiden Bipolarplattenhalbschalen kann eine weitere Widerstandsreduktion erreicht werden, weiterhin wird die Korrosion reduziert (Mohr 2012, S. 6). Darüber hinaus kann die Bipolarplatte auch noch eine Kontaktstelle für einen Spannungsabgriff für das spätere Cell-Voltage-Monitoring (CVM) beinhalten (Yoon et al. 2013).

2.2.2 Gas Diffusion Layer

Die Gas Diffusion Layer (GDL) dient der Verteilung der Gase in der aktiven Fläche der Zelle und der elektrischen Kontaktierung. Weiterhin wird das kathodenseitig entstehende Wasser durch die GDL abgeführt. Als Grundmaterial für die GDL dienen Kohlestofffasern. Diese Fasern werden zu einem Vlies oder einem Papier verarbeitet (Bach 2015 S. 12). Zumeist wird die GDL auf der der Membran zugewandten Seite mit einer mikroporösen Schicht versehen (*engl. Micro Porous Layer, MPL*). Die MPL verbessert die elektrische Kontaktierung, sorgt für eine feinere Verteilung der Gase und schützt die dünne CCM vor Beschädigungen durch sich lösende Kohlestofffasern (Bach 2015, S. 8, Butsch 2012, S. 21).

Durch die Faserstruktur zeigt die GDL ein anisotropes Verhalten in Maschinenrichtung (*engl. Machine Direction, MD*) sowie quer dazu (*engl. Transverse Direction, TD*) (Kleemann, Finsterwalder & Tillmetz 2009).

Die Orientierung hat sowohl Einfluss auf die Handhabung als auch auf das Funktionsverhalten der Brennstoffzelle und ist daher in jedem Fall zu beachten.

Die Materialstärken einer GDL bewegen sich zumeist zwischen 170 µm und 450 µm (Rashapov, Unno & Gostick 2015). Für einen möglichst geringen Kontaktwiderstand muss ein Anpressdruck gewährleistet sein, gleichzeitig sollte die Intrusion der Fasern in das Flowfield geringgehalten werden. Der Anpressdruck wird dabei durch eine Vorspannung sowie durch das elastische Verhalten der Brennstoffzelle gewährleistet.

2.2.3 Catalyst Coated Membrane

Die Catalyst Coated Membrane (CCM) bildet den elektrochemischen Kern einer Brennstoffzelle. Die CCM ist ausschließlich für Protonen leitfähig. Die Protonen wiederum entstehen in Anwesenheit eines Katalysators, zumeist Platin, aus Wasserstoffmolekülen durch Oxidation. Grundmaterial der Membran stellt ein Copolymer aus Perfluorsulfonsäure (PFSA) und Polytetrafluorethylen (PTFE) dar.

Die Membran ist zur Verminderung von Transportverlusten nur wenige Mikrometer dünn (Liu & Sung 2012). Elastizitätsmodul und Dehngrenze sind niedrig, weshalb das Grundmaterial durch ein Grundgerüst aus einer etwa 3 µm starken (Kim et al. 2021) ePTFE-Folie (*expanded PTFE*) verstärkt werden kann, um akzeptable mechanische Eigenschaften zu erhalten (Arcella, Merlo, & Ghielmi 2011, S. 481). Maßgeblich dafür ist die mechanische Belastung während des Betriebs einer Brennstoffzelle. Um im Einsatz Protonen leiten zu können, muss die Membran eine bestimmte Feuchtigkeit durch Aufnahme von Wasser aufweisen (Arico 2016, S. 773). Diese Wasseraufnahme bewirkt ein Quellen des Materials. In der Folge kommt es zu dimensionalen Änderungen, wobei faserverstärkte Membrane eine deutlich geringere Quellung zeigen (Shi, Weber & Kusoglu 2016). Dieses Verhalten zeigt sich ebenfalls während der Weiterverarbeitung der Membran innerhalb der Produktion. Eine Konditionierung der Luft ist daher zwingend erforderlich, beispielsweise zwischen 40 % und 50 % relativer Luftfeuchte bei 21 °C (Valentine, James & Lakshmanan 2009). Sowohl Quellverhalten als auch mechanische Eigenschaften zeigen eine Anisotropie zwischen der Maschinenrichtung (*engl. Machine Direction, MD*) und der Querrichtung (*engl. Transverse Direction, TD*). Bei verstärkten Membranen sowie extrudierten Membranen ist die Anisotropie im Vergleich zu gegossenen Membranen deutlich ausgeprägter. (Arcella, Merlo, & Ghielmi 2011, S. 481)

2.2.4 Membrane-Electrode-Assembly (MEA)

Bei der Membrane-Electrode-Assembly (MEA) handelt es sich um eine Baugruppe. Die Bezeichnung der MEA ist nicht eindeutig, umfasst aber in jedem Fall Membran und Beschichtung, was der zuvor dargestellten CCM entspricht. Die CCM wird in der Literatur daher teilweise als 3-Lagen-MEA bezeichnet. Wird diese CCM in einem zumeist zweiteilig laminiert aufgebautem Subgasket eingebettet, so handelt es sich um eine 5-Lagen-MEA. Für den Subgasket eignen sich insbesondere inerte Materialien, beispielsweise Polyethylen (PE) oder Polyethylennapthalat (PEN) (Han et al. 2010A). Alternativ kann der Subgasket nur einlagig ausgeführt werden, wobei dann ein separater Klebstoff aufzubringen ist (Pretzel et al. 2017). Werden zusätzlich Anoden- und Kathoden-GDL verbunden, so wird diese dann als 7-Lagen-MEA, gelegentlich auch MEFA (*Membrane-Electrode-Frame-Assembly*, Prass et al. 2021) oder MEGA (*Membrane-Electrode-Gasket-Assembly*, Jeong & Yoo 2021) bezeichnet.

Im Folgenden wird MEA für einen Verbund aus GDL, CCM sowie Subgasket verwendet (7-Lagen-MEA). Abbildung 2-3 zeigt den Aufbau einer MEA mit der bereits in Abbildung 2-2 dargestellten Bipolarplatte. Die CCM sowie die GDL stellen dabei die elektro-chemisch aktive Fläche dar, die zwischen dem bereits zuvor beschriebenen Flowfield der Bipolarplatte liegt.

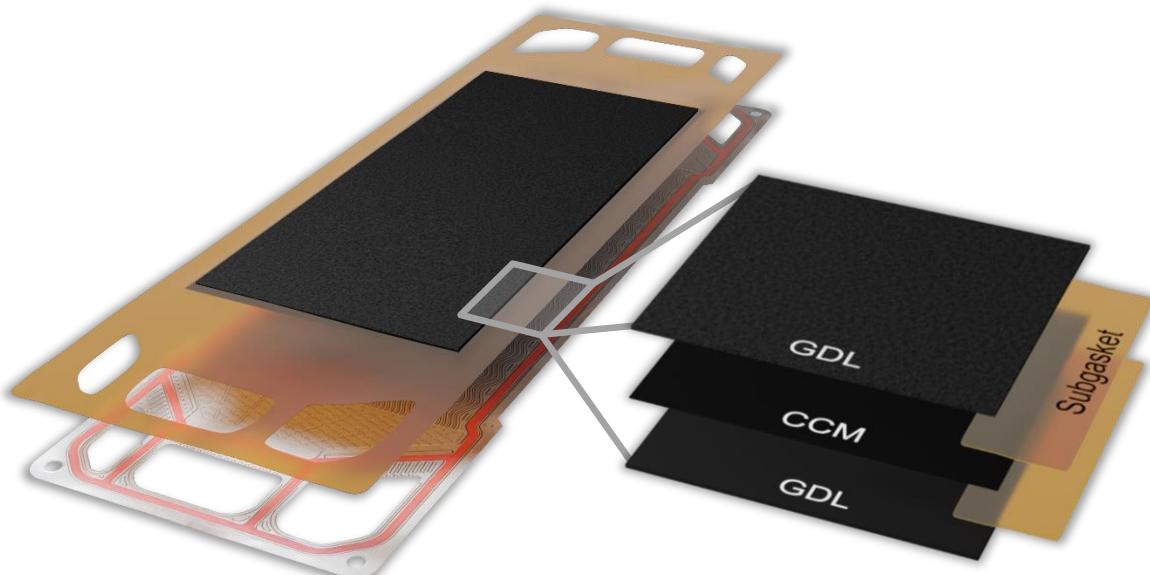


Abbildung 2-3 Ausschnitt einer 7-Lagen-MEA, darunter Bipolarplatte

Alternative Konzepte zum Aufbau einer MEA sehen den Einsatz einer sogenannten Gas Diffusion Electrode (GDE) vor, bei der der Katalysator auf die GDL aufgebracht wird (Jayakumar 2018). Der Aufbau wird in der Forschung beleuchtet, ein industrieller Einsatz ist bisher aber nicht bekannt.

2.3 Konstruktionsvarianten

Obgleich dieselben Materialien verwendet werden und die elektrochemische Zelle gleich aufgebaut ist, unterscheidet sich der Aufbau zwischen einzelnen Herstellern. Dies kann in unterschiedlichen Anforderungen für verschiedene Anwendungsfälle oder durch bestehende Schutzrechtansprüche begründet sein. Da dies zum Teil erheblichen Einfluss auf die Produktionstechnik haben kann, soll im Folgenden auf verschiedene Konstruktionsvarianten eingegangen werden. Die Konstruktionsvarianten sind stark beeinflusst durch die verwendete Fertigungstechnik, die in Kapitel 2.4.2 erläutert ist.

Haupteinflussgebend ist das dem Stack zugrunde liegende Dichtungskonzept. So kann die Dichtung Bestandteil der Bipolarplatte (Seal-on plate), der GDL (Seal-on GDL) oder der MEA (Seal-on MEA) sein, wie in (Stahl 2018) beschrieben. Eine Seal-on Plate Dichtung kann mit verschiedenen Verfahren hergestellt werden, wie in Abbildung 2-4 dargestellt. Siebdruckdichtungen sind typischerweise sehr dünn, eine zusätzliche elastische Wirkung wird durch eine Sicke erzeugt. Spritzgussdichtungen sowie dispensierte Dichtungen sind dicker, Anpresskräfte werden durch das elastische Verhalten der Dichtung erzeugt.

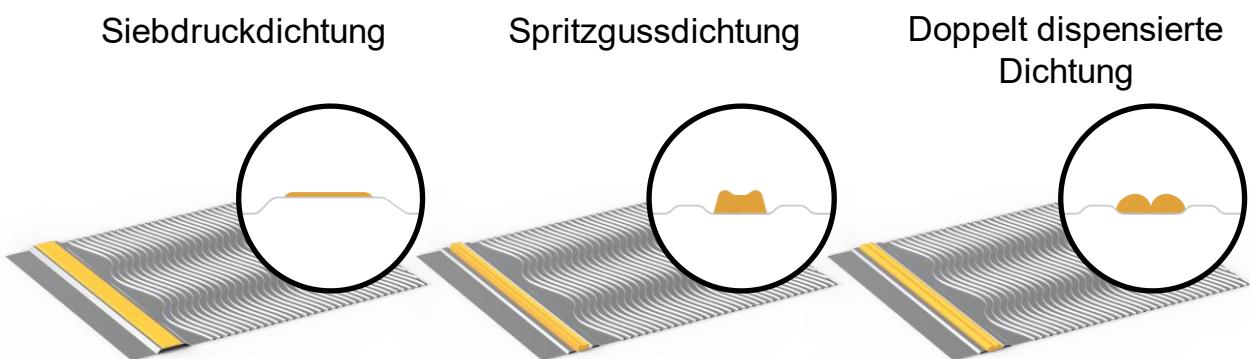


Abbildung 2-4 Dichtungsbereich in verschiedenen Ausführungen

Ein alternatives Konzept stellt die Verwendung einer sogenannten Seal-on-GDL dar. Bei dieser ist die Dichtung auf der GDL aufgebracht und somit nicht Bestandteil der Bipolarplatte. Der Verbund der MEA wird als Stapelung aus einer Anoden-GDL, einer Kathoden-GDL sowie der CCM hergestellt. Bei der Herstellung muss jedoch beachtet

werden, dass die Temperaturausdehnungskoeffizienten zwischen GDL und Dichtung unterschiedlich sind und zu Formabweichungen führen können (Stahl et al. 2020).

Den bisher diskutierten Konzepten ist gemein, dass eine Aufteilung in Bipolarplatte und MEA stattfindet, bei der die Aufteilung in die Bauteile und deren Funktionen nicht deckungsgleich mit der galvanischen Zelle ist. Eine Alternative dazu ist in (Kurihara 2021, Nonoyama 2019) dargestellt. Dabei wird eine MEA (dort als MEGA bezeichnet) jeweils mit einer anoden- sowie einer kathodenseitigen Halbschale versehen. Halbschalen und MEGA werden im Anschluss mit Klebstoff umspritzt. Nach (Takahashi et al. 2022) wird dieser Aufbau im Toyota Mirai der zweiten Generation verwendet, wodurch die Prozessdauer zur Fertigung verkürzt werden konnte.

2.4 Prozesskette der Brennstoffzellenherstellung

Die Brennstoffzellenstackfertigung lässt sich in drei Gewerke unterteilen: Bipolarplattenfertigung, MEA-Fertigung und Stack-Assembly, wie in Abbildung 2-5 dargestellt. Wie zuvor in Kapitel 2.3 erläutert existieren im Stand der Technik verschiedene Abwandlungen, die hier in der vereinfachten Darstellung nicht übernommen wurden. Die Prozesskette soll im Nachfolgenden hinsichtlich der Einflüsse zwischen Produkt und Produktion und resultierenden Taktzeiten beleuchtet werden. Die in Abbildung 2-5 gestrichelt umrandeten Komponenten werden als Zukaufkomponenten betrachtet, daher wird im Folgenden nicht weiter auf deren Herstellung eingegangen.

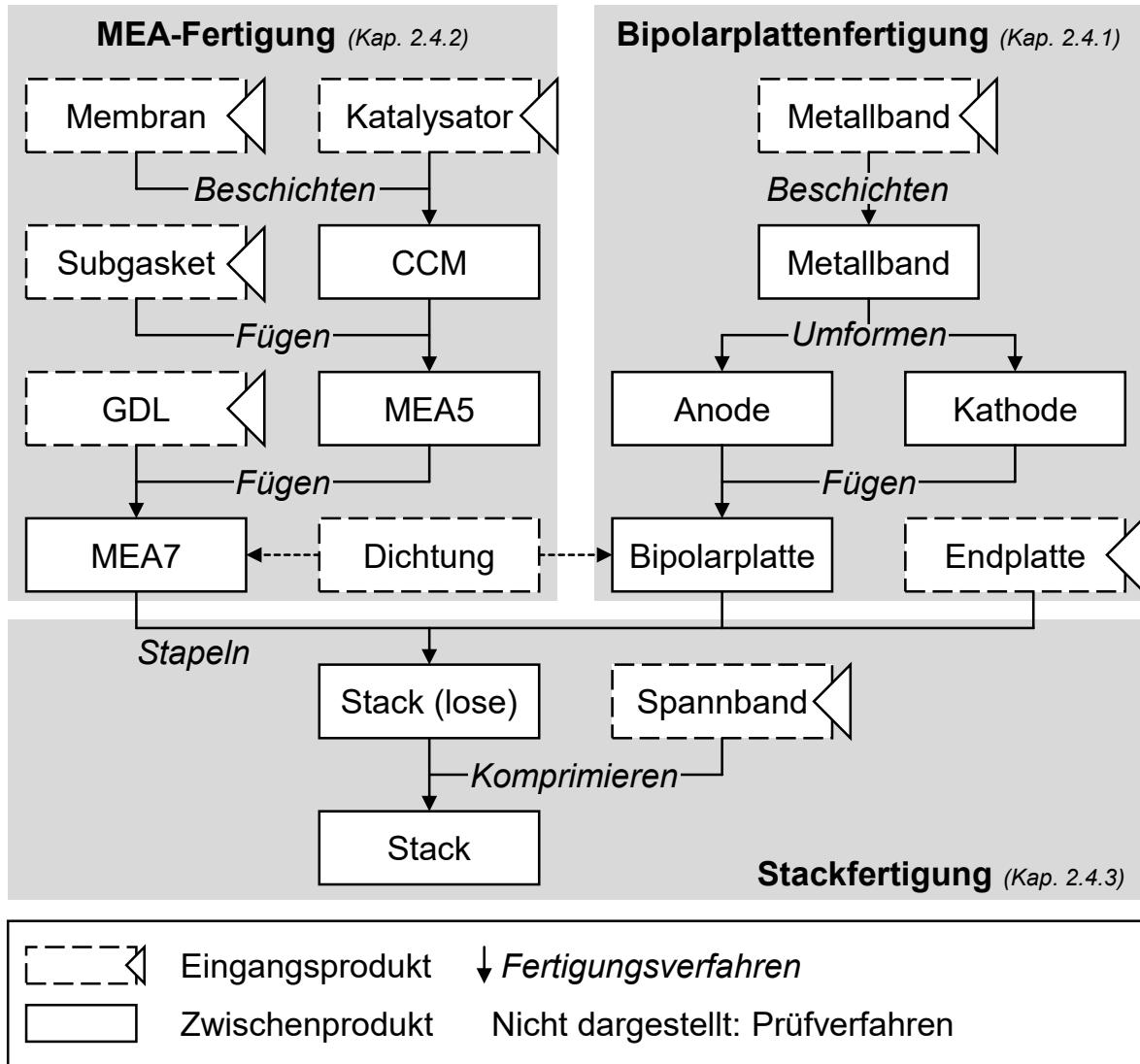


Abbildung 2-5 Prozesskette eines Stacks mit metallischen Bipolarplatten

2.4.1 Bipolarplatte

Die Bipolarplatte kann sowohl aus Metall als auch aus Graphit gefertigt werden. Durch die Materialien unterscheiden sich ebenfalls die Fertigungsverfahren und damit letztlich auch die geometrischen Merkmale. Metallische Bipolarplatten lassen sich mit kurzen Prozesszeiten herstellen, durch die Verwendung dünner Bleche lässt sich eine hohe volumetrische Energiedichte erreichen. Brennstoffzellenstacks mit graphitischen Bipolarplatten hingegen zeigen eine deutlich niedrigere chemische Degradation. Im Mobilitätssektor finden derzeit beide Varianten Anwendung, wobei im Folgenden auf die unterschiedlichen Prozessrouten eingegangen werden soll.

2.4.1.1 Metallische Bipolarplatten

Metallische Bipolarplatten werden aus einer zumeist 75 µm starken Metallfolie hergestellt (Gaugler et al. 2021), die zunächst umgeformt und getrennt wird. Im Anschluss daran ist ein Fügeverfahren notwendig, um die beiden Bipolarplattenhalbschalen miteinander zu verbinden und damit die für die Kühlung notwendige Kavität zu schaffen.

Umformen, Trennen

Die Metallfolien der Bipolarplatte müssen so umgeformt werden, dass das Flowfield ausgebildet wird, es jedoch gleichzeitig zu keiner Materialausdünnung kommt (Hu et al. 2014). Dabei muss sowohl eine Anode als auch eine Kathode hergestellt werden, die in der Regel unterschiedliche Konstruktionen aufweisen. Das Stanzen kann in einem Folgeverbund (Schlatter 2017) erfolgen. Im Folgeverbundwerkzeug wird die Form und Kontur in mehreren Schritten ausgearbeitet, wobei das Austrennen des Bauteils aus dem Blechabschnitt den letzten Schritt darstellt (Schlatter 2017).

Alternativ ist eine Herstellung im sogenannten Hydroforming möglich (Janßen et al. 2018). Dabei wird das Material in ein Werkzeug eingelegt, um eine Kavität zwischen Werkzeug und Werkstück zu bilden. Nach dem Verschließen des Werkzeuges wird die Folie rückseitig durch ein hydraulisches Medium mit Druck beaufschlagt und schmiegt sich an die Werkzeuggeometrie an. Prinzipbedingt erfolgt dabei kein Austrennen der Außenkontur, der Manifolds sowie der Port-Bereiche, weshalb ein nachfolgendes mechanisches Stanzen oder Laserschneiden notwendig ist. In (Porstmann, Wannemacher & Richter 2019) wird von einer Prozesszeit von insgesamt 9 s ausgegangen, inklusive des Einlegens und des Schließens.

Während des Umformens wirken hohe Kräfte auf das Material ein, es verbleiben Eigenspannungen im Material. Dies führt zu bistabilen Bauteilzuständen, das Verhalten wird auch als Knackfrosch bezeichnet (Dreier 2018).

Beschichten

Die Beschichtung muss aufgebracht werden, um die elektrische Leitfähigkeit zu erhöhen. Weiterhin wird die Korrosion des Substrates vermindert, welche über die Lebensdauer hinweg ebenfalls zu erhöhten Widerständen und damit zu geringeren Wirkungsgraden führen würde. Korrosion kann daneben dazu führen, dass sich metallische Ionen in Lösung begeben und die Wirkung des Katalysators behindern. (Wind et al. 2002, Claude et al. 2016)

Die Beschichtung kann, wie hier eingeordnet, nach dem Umformen geschehen. Anzutreffen sind aber ebenfalls vorbeschichtete Halbzeuge (Müller et al. 2022, Schuler Automation 2018) oder ein Beschichten nach dem Fügen (Müller et al. 2022) der Bauteile. Vor dem Beschichten ist die Bipolarplatte zu reinigen, um Ziehfette oder sonstige Verunreinigungen zu entfernen (Schuler Automation 2018).

Eine etablierte Methode zur Herstellung einer Korrosionsschutzschicht bildet die Beschichtung mit Gold. Aufgrund hoher Materialkosten wurden jedoch weitere Verfahren entwickelt, beispielsweise kohlestoffbasierte Beschichtungen, auch als Carbon Nano-Coating (Yumiya, Kizaki & Asai 2015) oder Graphite Like Carbon (GLC) bezeichnet. Gegebenenfalls geschieht die Beschichtung unter Zuhilfenahme einer Zwischenschicht als Haftvermittler (Müller et al. 2022). Unter anderem können auch die sogenannten MAX-Phasen auf Kohlenstoff basieren. Bei den MAX-Phasen handelt es sich um Carbide oder Nitride, die im stöchiometrischen Verhältnis $M_{n+1}AX_n$ vorliegen, wobei sich M und A auf ein frühes Übergangsmetall sowie ein A-Gruppen-Element und X auf Kohlenstoff oder Stickstoff bezieht (Astrom et al. 2011).

Im Fall von Titanbipolarplatten dient die Beschichtung vorrangig zur Reduktion der Kontaktwiderstände, es kann beispielsweise amorpher Kohlenstoff verwendet werden (Yumiya, Kizaki & Asai 2015).

Die Beschichtung hat dabei maßgeblich Einfluss auf spätere Möglichkeiten zur optischen Vermessung der Bipolarplatte, da unterschiedliche Reflektivitäten erreicht werden.

Bei der Verwendung von Beschichtungsverfahren aus einem gasförmigen Ausgangszustand wie PVD, CVD oder PECVD sind hohe Gesamtprozesszeiten notwendig, um die gewünschten Schichtdicken zu erzielen. In (Yi et al. 2019) wird von einer Beschichtungszeit von 30 min berichtet mit einem vorgelagerten Reinigungsschritt von 30 min und anschließender Belüftung von 20 min. In (Lyo et al. 2011) ist ein

anderer Prozess beschrieben, der eine Oxidation zwischen 10 und 100 Minuten mit anschließender Reduktion zwischen 30 und 180 Minuten vorsieht. Kürzere Prozesszeiten lassen sich durch selektive Beschichtungen der Stege erreichen, beispielsweise durch graphithaltige Suspensionen, die im Sieb- oder Walzendruck aufgetragen und anschließend polymerisiert werden (Ströbel et al. 2004).

Fügen

Das Fügen geschieht in der Regel durch Laserschweißen. Dabei werden die beiden Halbschalen zueinander ausgerichtet und im Parallelstoß verschweißt. Die Schweißnaht muss in jedem Fall eine Dichtheit herstellen, weswegen geschlossene Konturen erzeugt werden müssen. Ferner sind aufgrund der geringen Materialstärken nur geringe Fügespalte zulässig, was aufwendige Spannvorrichtungen mit beidseitiger Zugänglichkeit sowie segmentierten Nähten erfordert (Nakamura 2020), die sich definiert überkreuzen (Bayer, Stahl & Kraft 2019). Die Prozessgrenze liegt etwa bei einer Schweißgeschwindigkeit von 500 mm/s (Schäfer & Fleischer 2021). Bei höheren Schweißgeschwindigkeiten kommt es zu einer Schmelzbadinstabilität (sogenanntes „humping“) und in der Folge zu funktionskritischen Defekten bis hin zum unerwünschten Durchbrand. Daneben wird zum Teil auch im aktiven Bereich der Brennstoffzelle gelasert (sog. Active Area Welding, Janßen et al. 2018). Diese Schweißnaht führt zu einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen den Bipolarplattenhalbschalen und reduziert damit den elektrischen Widerstand. Der in der Umformung beschriebene Effekt der bistabilen Bauteilzustände (Knackfrosch) wird durch das Laserschweißen noch verstärkt und kann eine angepasste Schweißstrategie zur Minimierung des thermischen Einflusses erfordern (Gaugler et al. 2004).

2.4.1.2 Graphitische Bipolarplatten

Halbschalenherstellung

Aufgrund der geringen Korrosion bietet sich Graphit für den Einsatz als Bipolarplatte an. Graphit wird in Form von Blähgraphit pulverförmig (beispielsweise in Korngrößen von Mesh 100 oder weniger) mit Harz vermischt und geknetet. Es erfolgt eine teilweise Gelierung und das Harz wird in den sogenannten B-Zustand überführt (Bacher, Oettinger & Langer 2002). Der Vorformling wird in eine Presse eingelegt und bei 150 °C bis 160 °C und etwa 10 MPa bis 50 MPa Druck ausgehärtet (Saito et al. 2004). Der Mischung können noch 0,1 - 1 Masseprozent Trennmittel hinzugegeben werden, um das Ausformen zu erleichtern. Die Prozesszeit liegt zwischen einer (Tanno 2008) und

zehn Minuten (Saito et al. 2002), in (Porstmann, Wannemacher & Richter 2019) sind 30 Sekunden genannt. Gegebenenfalls kann eine anschließende Wärmebehandlung von bis zu 72 h notwendig sein (Saito et al. 2004). Die Nutzung mehrerer Kavitäten bietet die Möglichkeit die Taktzeit weiter zu reduzieren, bleibt jedoch oberhalb der metallischer Platten.

Für minimale elektrische Widerstände muss die graphitische Bipolarplatte an der Kontaktstelle zur GDL eine bestimmte Rauigkeit aufweisen, die typischerweise zwischen $Ra = 10 \mu\text{m}$ und $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ liegt (Inoue 2006), was beispielweise durch den Einsatz einer Säure oder mechanische Abrasion geschehen kann (Saito, Hagiwara & Tanno 2005).

Verkleben

Die beiden Halbschalen werden im Anschluss zu einer Bipolarplatte gefügt. Hierfür wird ein Klebstoff auf Epoxidharzbasis verwendet. Während des Verklebens ist es wichtig, dass eine möglichst hohe elektrische Leitfähigkeit beibehalten wird. Weiterhin müssen die Betriebstemperaturen ohne Versprödung oder Kriechen ertragen werden (Blunk et al. 2005). Sich einstellende Übergangswiderstände sind bei Klebungen zumeist größer im Vergleich zu einer Laserschweißung metallischer Platten (Meuser & von Unwerth 2021). Der Klebstoff kann durch Siebdruck in einer Stärke von 100 bis 400 μm aufgebracht werden, anschließend werden die Platten bei einem Druck zwischen 0,02 und 4 MPa und einer Temperatur zwischen 150 °C und 200 °C bei 1 - 30 min gefügt (Horiuchi & Nakamura 2022).

2.4.2 Dichtung

Im Siebdruck wird eine etwa 200 μm dünne Schicht (Stahl 2018, S. 25) auf eine zwischen 0,4 mm und 0,6 mm starke Vollsicke (Reinz Dichtungs GmbH 2016, Gaugler et al. 2021) aufgebracht. Dabei unterstützt die federnde Wirkung der Sicke das elastische Verhalten der dünnen Siebdruckdichtung (Reinz Dichtungs GmbH 2015). Von Vorteil ist dabei, dass sich der Dichtungsauftrag von dem Vernetzungsprozess trennen lässt, weiterhin kommt es nur zu einem geringen Materialeinsatz. Üblicherweise umfasst ein solches Design eine Portabdichtung sowie eine Außenabdichtung (Speidel & Gaugler 2022). Die Trocknung geschieht in einem Durchlaufofen, beispielsweise bei etwa 10 min (Grandjean 2018) bis 20 min (Lim, Heo & Kim 2014) zwischen 80 °C (Grandjean 2018) und 150 °C (Lim, Heo & Kim 2014). Die

Prozessdauer zur Beschichtung selbst kann mit etwa 4 s veranschlagt werden (Lim, Heo & Kim 2014).

Bei einer spritzgegossenen Dichtung hingegen wird die Bipolarplatte in ein Werkzeug eingelegt, welches anschließend geschlossen wird. Im Anschluss werden die unvernetzten Ausgangsstoffe der Dichtung eingespritzt, die Vernetzung geschieht anschließend im Werkzeug. Dies bedingt, dass die T90-Zeit (90 % Vernetzung) die Prozesszeit im Wesentlichen bestimmt. Ungefährre Prozesszeiten sind in Tabelle 2-1 vermerkt.

Tabelle 2-1 Prozesszeiten des Spritzgießens einer Seal-on Plate Dichtung

Prozesswert	Minimum	Maximum	Quelle
T90	210 s	300 s	(Hong et al. 2017)
	50 s	280 s	(Suzuki & Kawasaki 2020)
	24 s	92 s	(Hornig, Will & Schurek 2021)

Zuletzt ist auch eine dispensierte Dichtung anzutreffen. Dabei trägt ein Dispensierkopf das Material über eine Düse auf die Bipolarplatte auf. Die Prozesszeiten sind hoch, da die gesamte Kontur abgefahren werden muss. Weiterhin stellen T-Stöße eine Herausforderung hinsichtlich der Höhentoleranz der Dichtung dar.

Die Dichtung kann auch um den Verbund aus CCM und zwei GDL gespritzt werden, wie in (Artibise & Farrington 2006) dargestellt. Es ist davon auszugehen, dass die Prozesszeiten in einer ähnlichen Größenordnung zu denen einer Seal-on Plate Dichtung liegen. Aufgrund der verwendeten Materialien, insbesondere der CCM, sind jedoch geringere Temperaturen einzuhalten. Neben dem Umspritzen von GDL und CCM kann die Dichtung ebenfalls auf den Subgasket aufgebracht werden (Stahl 2018, S. 26, Kemmerich 2018).

2.4.3 Membrane-Electrode-Assembly

2.4.3.1 Catalyst Coated Membrane

Für die Herstellung der Grundmembrane haben sich drei Herstellungs routen etabliert: Schmelzextrusion, Foliengießen sowie die Imprägnierung einer Faserverstärkung. In der Schmelzextrusion wird das Ionomer als Vorstufe in einem Extruder aufgeschmolzen und zu einer dünnen Folie geformt. Durch anschließendes Recken wird die Zieldicke erreicht. In Folge des Reckens kommt es zu einer starken Anisotropie. Die Membran

wird im Anschluss nasschemisch in ihre ionische Form überführt. Im Folienguss hingegen wird das Ionomer in ionischer Form direkt in Lösung auf ein bewegliches Substrat gegossen und anschließend getrocknet. Alternativ kann eine poröse Trägerschicht mit Ionomer imprägniert werden. Bedingt durch die Herstellung der porösen Trägerschicht sowie durch Einsatz von Lösemitteln und Hitze zeigen solche Membrane ebenfalls anisotropes Verhalten. (Arcella, Merlo, & Ghielmi 2011, S. 486f)

In einem zweistufigen Prozess erfolgt im Anschluss die Beschichtung der Membran. Aufgrund des zuvor beschriebenen Quellverhaltens stellt eine direkte Beschichtung der Membran aus einer Dispersion mit flüssigem Lösemittel eine Herausforderung dar. Die Beschichtung, zum Teil auch als Elektrode bezeichnet, wird daher zunächst auf einer als Decal-Folie bezeichneten Trägerfolie aufgebracht und getrocknet. Im Anschluss wird die Beschichtung auf der Decal-Folie unter Temperatur und Druck auf die eigentliche Membran übertragen. Industriell verbreitet sind durchgängige Rolle-zu-Rolle Verfahren für die Beschichtung und den Decal-Prozess. (Frölich 2014)

2.4.3.2 7-Lagen-MEA

Ausgangsmaterial für die Herstellung einer MEA sind die in Rollenware bereitgestellten Halbzeuge GDL, CCM und Subgasket. Zunächst wird der spätere aktive Bereich des Subgasket ausgeschnitten. Um starke Schwankungen in der Bahnspannung und in der Folge Formänderungen zu vermeiden, erfolgt dies im Halbschnitt, so dass ein Liner als Trägermaterial verbleibt und im weiteren Verlauf entgittert werden kann (Chen et al. 2016) (s. Abbildung 2-6, 1). Im Anschluss daran wird die CCM auf die ausgesparte Fläche aufgebracht (s. Abbildung 2-6, 2). Der zweite Subgasket wird anschließend ebenfalls vorgeschnitten auf Trägerfolie bereitgestellt (s. Abbildung 2-6, 3) (Chen et al. 2016). Der Subgasket kann dabei mit Klebstoff vorbeschichtet sein, welcher bei 70 °C bis 150 °C durch eine Kaschierwalze erwärmt werden muss (Gottschalk, Landvogt & Gehrold 2022) (s. Abbildung 2-6, 4).

Die Herstellung des dafür notwendigen CCM-Einzel sheets kann beispielsweise durch Ausstanzen (Dylla et al. 2022) erfolgen. Zur Herstellung einer 5-Lagen-MEA wird im Anschluss daran die zugeschnittene GDL auf den Rand des Subgasket durch Kleben, Thermokompressionsbonden oder Heißsiegeln aufgebracht (Kawai 2010; Kim, Kim & Jeon 2013A). Dabei ist zu beachten, dass die Seite mit MPL-Beschichtung hin zur CCM zeigt.

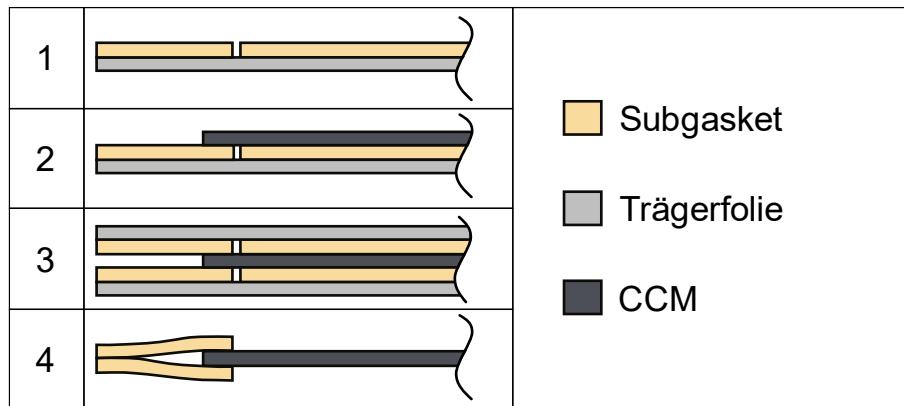


Abbildung 2-6 schematische Prozessfolge 5-Lagen-MEA

Sämtliche Halbzeuge müssen dabei zugeschnitten werden, wofür sich unterschiedliche Verfahren eignen. So kann die GDL beispielsweise durch Rotationsstanzen (Kawai 2010) oder mittels eines Faserlasers bei geringer Leistung zugeschnitten werden (Hwang & Lee 2017). Dem Folgeprozess wird die GDL magaziniert mit Zwischenlagen bereitgestellt.

Alternativ zur Herstellung im Pick & Place kann die MEA auch in einem kontinuierlichen Prozess hergestellt werden. Da die Einzelkomponenten unterschiedliche Abmaße aufweisen, ist die mittlere Abwickelgeschwindigkeit zwischen den Komponenten unterschiedlich. In der Folge müssen die in Maschinenrichtung kleineren Komponenten GDL und CCM nach dem Zuschnitt beschleunigt werden, sofern verschneittfrei gearbeitet wird. Dies schränkt erreichbare Genauigkeiten in der Ablageposition ein.

Eine alternative Konstruktion bietet der Aufbau mit einer GDL-integrierten Dichtung (Seal-on GDL, s. Stahl 2018). Die Dichtung wird dabei in einem vorgelagerten Prozess auf die GDL aufgebracht. Vorteilig ist dabei, dass die Handhabung der formlabilen Dichtung vermieden wird. Der Prozess kann wahlweise mit der Anoden- oder Kathodenseite beginnen. Auf die erste GDL wird die CCM aufgelegt, gefolgt von der zweiten GDL.

2.4.4 Stack

Das Stacking beginnt mit dem Einlegen des Medienmoduls beziehungsweise der Endplatte, eines Isolators und des Stromabnehmers. Auf diesen Grundaufbau werden abwechselnd Bipolarplatte und MEA gestapelt, wobei die äußeren beiden Bipolarplatten häufig abweichend aufgebaut sind. Durch die vorgelagerten Prozessschritte werden die Bauteile magaziniert zugeführt (Moteki 2020). Die Zellenanzahl

unterscheidet sich dabei je nach gewünschter Leistung und Spannung, wobei mehr Zellen eine höhere Spannung und größere Leistung erzielen. Die Stapelhöhe ist im Wesentlichen durch auftretende Druckverluste und in der Folge inhomogene Ausnutzung limitiert. Nach (Lee, Park & Cho 2016) muss eine Parallelität der Endplatten von 1,5 mm über einen unverspannten Stack mit 500 Zellen eingehalten werden.

Zur optimalen Bauraumausnutzung wird ein möglichst geringes Pitchmaß angestrebt, beispielsweise etwa 1,4 mm im Toyota Mirai der ersten Generation (Yumiya, Kizaki & Asai 2015). Das Pitchmaß beschreibt dabei den Abstand zweier sich wiederholender Einheiten benachbarter Zellen. Geringe Pitchmaße bringen die Gefahr mit sich, dass sich bei unzureichenden Schutzmaßnahmen zwei Bipolarplatten berühren können und es zu einem Kurzschluss kommt. Als Gegenmaßnahme ist häufig anzutreffen, dass die MEA größer als die Bipolarplatte ausgeführt wird (Munthe 2021A).

Während des eigentlichen Stackings werden abwechselnd Bipolarplatte und MEA aufeinander gestapelt. In einigen Ausführungen erfolgt dabei zunächst ein Verbinden zwischen MEA und Bipolarplatte (Haluschka et al. 2022), ehe der Verbund aufeinander gestapelt wird.

Im Anschluss an das Stapeln wird der Stack komprimiert und mit Spannbändern (Noh 2019) oder Spannbolzen (Gaugler et al. 2009) fixiert. In der Kompression wird die GDL um etwa 25 % komprimiert, der Kontaktdruck in der aktiven Fläche beträgt zwischen 1 und 2 MPa (Simon 2015). Der Prozess ist dabei in der Regel kraftgeführt (Kraft, Morcos & Götz 2016). Um Setzverluste und thermische Ausdehnung (Akimoto 2008) auszugleichen, können Federn im System enthalten sein (Konno et al. 2015).

2.5 End of Line Prüfungen

DIN EN 62282-2 spezifiziert die notwendigen Stückprüfungen für einen Brennstoffzellenstack (DIN 2021). Dabei ist sowohl eine Leckagefreiheit als auch eine elektrische Durchschlagfestigkeit durch eine Isolationsprüfung sicherzustellen. Zulässig für eine Leckageprüfung sind Durchflussmessverfahren sowie die Druckabfallmethode.

Im Durchflussmessverfahren ist der Brennstoffzellenstack mit Wasserstoff oder einem Inertgas mit Druck zu beaufschlagen und für eine Minute zu halten. Innerhalb dieser Messzeit darf es zwischen dem Prüfgerät und dem Prüfling zu keinem Durchfluss kommen. In der Druckabfallmethode ist ein Prüfdruck unter Verwendung von Wasserstoff oder Helium einzustellen. Anschließend wird der Druck im Stack für eine Minute überwacht. Anhand des Druckabfalls ergibt sich die Leckagerate. Für die einzelnen Bauteile Bipolarplatte und MEA sind keine Prüfungen spezifiziert. Da die Prüfmethoden zum einen erst zu einem späten Zeitpunkt in der Prozesskette erfolgen, zum anderen aber auch nur eine bedingte Lokalisierung der Fehlstelle erlauben, werden die Einzelbauteile häufig einer 100 % Prüfung unterzogen. Für die Leckageprüfung einer einzelnen Bipolarplatte können etwa 16 Sekunden veranschlagt werden¹. Eine Leckageprüfung kann entweder durch Detektion eines Druckabfalls oder durch Helium-Schnüffelsonden durchgeführt werden.

Der Hauptumfang der End of Line Prüfungen wird durch das sogenannte Konditionieren, in Teilen auch Break-in bezeichnet, vorgegeben. In diesem Prozess werden initiale elektrochemische Veränderungen in der Katalysatorschicht der Brennstoffzelle hervorgerufen, die zu einer Steigerung der maximalen Leistung und einer Erhöhung der Lebensdauer führen. Die spezifischen Verfahrensführungen sind dabei zumeist herstellerspezifisch und nicht öffentlich bekannt. Die Konditionierung selbst ist zumeist zeitintensiv, genaue Angaben dazu sind ebenfalls herstellerspezifisch und in der Regel nicht öffentlich verfügbar. In (Rapaport et al. 2013) werden 80-90 Minuten bei nicht vollständiger Erreichung der maximalen Leistung genannt, in (James et al. 2018) werden zwei Stunden angenommen.

¹ <https://www.marposs.com/ger/application/leak-testing-by-detecting-system-of-flow-plates>, abgerufen am 17.08.2022

2.6 Handhabungstechnik

Anforderungen an die Handhabungstechnik sind in VDI 2740 spezifiziert, ferner sind dort die grundlegenden Greifprinzipien genannt: Greifen durch Magnetismus, durch Oberflächenverhakung, durch Ansaugen, durch direktes pneumatisches oder hydraulisches Spannen sowie mechanisches Greifen (VDI 1995). Die Richtlinie fokussiert sich dabei auf dreidimensional geformte Bauteile. Die grundlegende Vorgehensweise ist jedoch auch auf flächige Bauteile übertragbar. Für die Handhabungsaufgabe ist zunächst eine Merkmalliste der Greifaufgabe zu erstellen. Diese beinhaltet kennzeichnende Merkmale des Greifobjektes, der Greifbewegung, des Greifkraftverlaufs sowie der Greiferperipherie. Daraus abgeleitet werden die Anforderungen an die Teilsysteme des Effektors: Das Wirksystem, das kinematische System, das Antriebssystem, das Informationsverarbeitungssystem sowie das Trägersystem. Aus diesen Informationen heraus wird das Leistungsprofil erstellt.

Diese Vorgehensweise wird im Folgenden auf die Spezifika der Brennstoffzellenfertigung und der dafür notwendigen Handhabungsaufgaben angewendet und anschließend dem aktuellen Stand der Technik gegenübergestellt.

2.6.1 Bauteilspektrum

2.6.1.1 Bipolarplatte (BPP)

Bei der Bipolarplatte handelt es sich aus Sicht der Handhabungstechnik um ein biegesteifes, oberflächig strukturiertes und zumeist nicht ferromagnetisches Bauteil. Dementsprechend eignet sich nur die Haftung durch Ansaugen oder durch mechanisches Greifen.

Die Bipolarplatte bringt jedoch auch produktspezifische Herausforderungen mit sich. So führen Eigenspannungen in metallischen Bipolarplatten durch das Umformen sowie durch das Laserschweißen zu bistabilen Zuständen, die zum Teil auch als Knackfrosch bezeichnet werden (Dreier 2018). Die Ausprägung des Knackfrosches ist dabei stark abhängig vom Bauteildesign sowie von dem Schweißprozess. Bauteile mit Schweißnähten im aktiven Bereich zeigen eine andere Charakteristik als solche ohne. Der Einfluss auf die erreichbaren Genauigkeiten wurde in der Literatur bisher nicht diskutiert. Das Flächengewicht ist mit $0,1185 \text{ g/cm}^2$ (Annahme: $75 \mu\text{m}$ Materialstärke, $\rho = 7,9 \text{ g/cm}^3$, bereits verschweißt) gering. Die Bipolarplatte an sich ist nicht porös, durch die Strukturierung der Platte kann allerdings kein vollständig luftdichtes Greifen

gewährleistet werden, so dass sie im Sinne der Handhabungstechnik als teilweise luftdurchlässig angesehen werden kann. Weiterhin weist die Bipolarplatte eine Beschichtung auf, bei der eine Beschädigung zu vermeiden ist.

Graphitische Bipolarplatten sind spröde (Cunningham, Huang & Baird 2013), wodurch hohe lokale Kräfte, wie beispielsweise beim mechanischen Greifen, zu einem Zerbrechen führen können. Wie metallische Platten auch weisen sie eine ausgeprägte Oberflächenstruktur auf, was ein vollständiges Abdichten eines Sauggreifers erschwert. Bei einer üblichen Dichte von $\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$ und einer Dicke von etwa 2 mm (Norley 2017) beträgt das Flächengewicht $0,34 \text{ g/cm}^2$ und liegt damit über einer metallischen Platte. Dies führt zu geringeren maximalen Haltekräften bei Vakuumgreifern und damit zu einer eingeschränkten Dynamik.

2.6.1.2 Gasdiffusionslage (GDL)

Bei der GDL handelt es sich um ein poröses Bauteil. Entsprechend kann bei der Handhabung durch Unterdruck kein hohes Vakuum aufgebaut werden. Weiterhin besteht die Gefahr, dass sich die dünnen C-Fasern (7-10 μm , Yuan et al. 2021, 6,5 μm Butsch 2013, S. 19) aus dem Vlies oder Papier lösen. Die herausgelösten Fasern können in der weiteren Fertigung zu einer Beschädigung der dünnen CCM führen, wobei es im weiteren Betrieb zu erhöhter Degradation kommt (Kreitmeier, Wokaun & Büchi 2012). Zur strömungstechnischen Optimierung sowie zum Schutz vor spitzen Fasern ist die GDL einseitig mit einer Mikroporösen Schicht (*engl. Micro Porous Layer, MPL*) versehen. Sofern eine GDL einzeln gehandhabt wird, muss sichergestellt werden, dass es zu keiner Verschleppung abgebrochener Fasern auf die MPL-Seite kommt. GDL der Hersteller Freudenberg, SGL Carbon oder Toray sind zwischen 110 und 423 μm Materialstärke kommerziell verfügbar. Die Flächengewichte liegen dabei zwischen 38 und 454 g/m^2 mit einer Porosität zwischen 39 und 90 %.

2.6.1.3 Catalyst Coated Membrane (CCM)

Die CCM bringt besondere Herausforderungen in der Handhabung mit sich. So beträgt die Materialstärke der Membran teilweise nur 5 μm (Liu et al. 2013). Bei der Handhabung darf keinesfalls die Streckgrenze des Grundmaterials überschritten werden. Üblicherweise liegt die Streckgrenze bei etwa 10 MPa (Tang et al. 2008). Im Falle einer Handhabung durch Vakuumtechnik muss sichergestellt werden, dass der anliegende

Differenzdruck nicht zu einer Deformation der Membran führt, wie in (Schäfer & Fleischer 2022) dargestellt.

Weiterhin zeigen sich bei der Membran starke Abhängigkeiten zwischen den mechanischen Eigenschaften und der umgebenden Luftfeuchtigkeit (Uchiyama, Kato & Yoshida 2012, Ma et al. 2022). Bei erhöhter Luftfeuchtigkeit expandiert die Membran, bei verringriger Luftfeuchte kontrahiert diese. Die anoden- und kathodenseitige Beschichtung kann sich in der Zusammensetzung unterscheiden, so dass eine korrekte Orientierung bei der Assemblierung sichergestellt werden muss. Unterschiedliche Schichtdicken auf Anoden- und Kathodenseite führen bei Luftfeuchteänderungen durch unterschiedliches Quellungsverhalten (Ma et al. 2022) darüber hinaus zu einer Krümmung, vergleichbar mit einem Bimetall unter thermischem Einfluss. Zuletzt kann ein Funkenüberschlag in Folge einer statischen Aufladung zu einer Selbstentzündung der Membran führen², was den Einsatz elektrostatischer Greifer einschränkt. Mit Dicken von 25,4 µm (NR211) und 50,8 µm (NR212) wird das Flächengewicht einer unbeschichteten Membran mit 50 g/m² und 100 g/m² angegeben. Funktionsbedingt kann von einer vollständigen Luftundurchlässigkeit ausgegangen werden. Das einzige mögliche Greifprinzip, das verwendet werden kann, ist die Haftung durch Ansaugen.

2.6.1.4 Membrane-Electrode-Assembly (MEA)

Die MEA als Verbundbaugruppe ist deutlich biegesteifer als ihre Einzelkomponenten. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass sowohl das Flächengewicht als auch die Steifigkeit über das Bauteil hinweg nicht einheitlich sind. So weist die aktive Fläche eine hohe Steifigkeit bei hohem Flächengewicht auf, der Subgasket hingegen weist nur eine geringe Steifigkeit auf.

Das Flächengewicht der aktiven Fläche setzt sich dabei aus der Anoden- und Kathoden-GDL sowie einer CCM zusammen und liegt, entsprechend dem zuvor genannten Spektrum, zwischen 126 g/m² und 946 g/m². Das Flächengewicht des Subgasket liegt ($\rho = 1,36 \text{ g/cm}^3$, 25 µm, doppelt) bei 68 g/m². Funktionsbedingt kann von einer vollständigen Luftundurchlässigkeit ausgegangen werden.

Daneben ist die MEA nicht plan, so dass es bei flächigem Greifen bei nicht angepasstem Gegenstück zu Verbiegungen kommt. Für eine MEA mit integrierter Dichtung sowie einer Seal-on GDL muss weiterhin berücksichtigt werden, dass diese

² <https://www.quintech.de/wp-content/uploads/2020/07/PI-NR212-2016-ENG.pdf> abgerufen 17.08.2023

Dichtung ein hohes Flächengewicht bei einer geringen Steifigkeit aufweist. Weiterhin gilt für die MEA, dass die darin liegende CCM vorherig beschriebene Luftfeuchtigkeits-abhängigkeiten zeigt. Daher ist auch hier die Produktionsumgebung entsprechend zu klimatisieren. Untersuchungen in der Literatur berücksichtigen vorrangig die feuchteinduzierte Expansion unter Betriebsbedingungen, in (Ma et al. 2022) ist der Einfluss wechselnder Umgebungsbedingungen auf die Produktion simulativ untersucht.

2.6.2 Bauteilanalyse: Effect of Defects

Nachfolgend werden die Auswirkungen von Assemblierungsfehlern auf die Funktion der Brennstoffzelle näher beschrieben. Bei den in der Literatur durchgeföhrten Untersuchungen wird zumeist ein Fehlermerkmal auf Zellebene, nicht jedoch auf Stackebene fokussiert. Eine systematische Betrachtung zu deren Wechselwirkungen ist nicht erfolgt, da diese in hohem Maße von dem zugrunde liegenden Design beeinflusst wird.

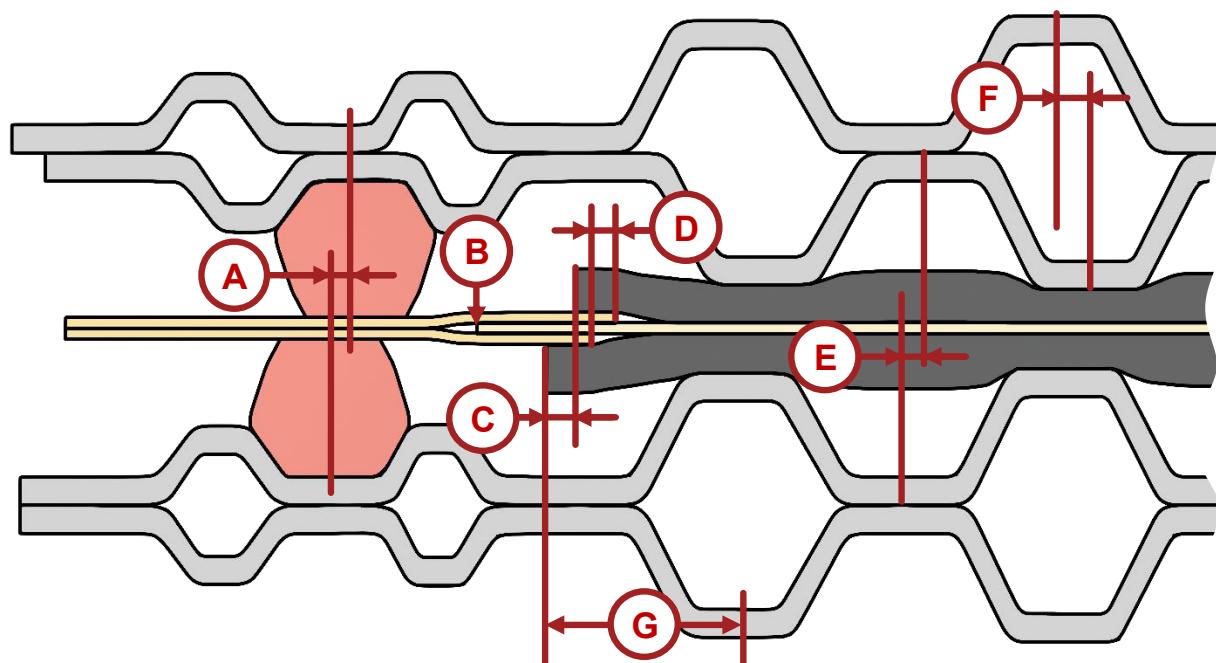


Abbildung 2-7 Querschnitt mit verschiedenen geometrischen Abweichungen A-G

A: Position der Dichtungen zueinander

In (Liang et al. 2017) wurde der Einfluss von Montageabweichungen unter Verwendung einer 7-Lagen-MEA mit graphitischer Bipolarplatte numerisch und experimentell untersucht. Die Dichtung ist dort allerdings als separates, nicht mit der Bipolarplatte gefügtes Bauteil ausgeführt, was zu einem Verrutschen führen kann. Aus diesem Grund

finden solche Designs keine breite industrielle Anwendung. In (Schmid 2018) wird ausgeführt, dass Versatz zwischen zwei Dichtungen beim Stapeln im anschließenden Verpressen zu seitwärts gerichteten Kräften führt. Weitere Untersuchungen wurden in (Liu et al. 2020) durchgeführt. In numerischen Versuchen wurde eine Spannungsüberhöhung durch Verformung des Subgasket durch Biegebelastung an der Dichtung festgestellt. In dem dort untersuchten Design mit einer Dichtlippe wurde die zulässige Positionsabweichung mit 0,05 mm beziffert. Den dort beobachteten Spannungsüberhöhungen kann jedoch durch eine größer gewählte GDL entgegengewirkt werden.

Zusammenfassung: Die notwendige Ausrichtung zweier Dichtlippen zueinander ist abhängig von dem gewählten Design. Unzureichende Ausrichtungsgüte führt zu Deformation und Beschädigung des Subgaskets.

B: Position der Katalysatorschichten zueinander

Üblicherweise wird die CCM-Beschichtung vollflächig ausgeführt. Dabei wird der Beschichtungsrand während der Produktion entfernt, um möglichen Überdeckungsfehlern vorzubeugen und Randeffekte an der Beschichtungskante zu vermeiden. Durch Verschnitt sowie die dann verdeckten Bereiche durch den Subgasket fallen jedoch zusätzlich Kosten an. Teilflächig beschichtete CCMs würden es erlauben, dass Kosten durch Minimierung des anfallenden Verschnitts respektive des platinhaltigen Katalysators reduziert werden können.

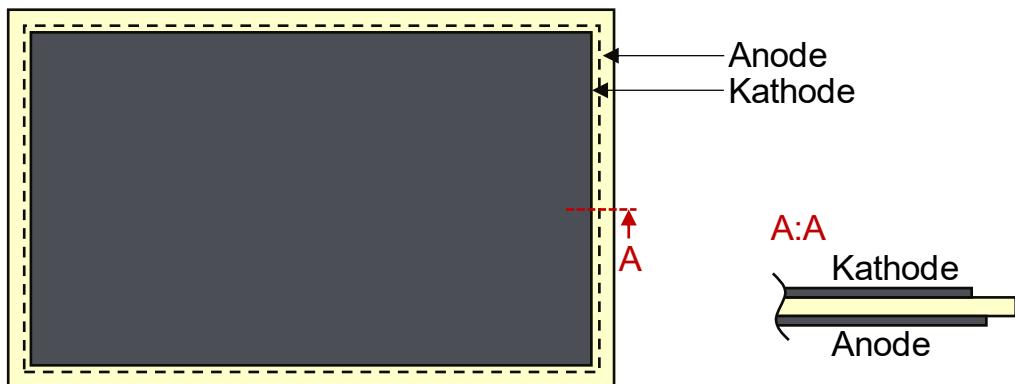


Abbildung 2-8 Mögliche Umsetzung teilflächig beschichteter CCM

In (Sompalli et al. 2007) wurden dabei auftretende Effekte untersucht. Ein Überstand der Kathodenbeschichtung führte zu einem vorzeitigen Ausfall der Brennstoffzelle durch Membranausdünnung, bei geringer Luftfeuchte nahm die Degradation auf

Anodenseite hingegen deutlich zu. Da dieser Betriebszustand relativ selten vorkommt, wird ein anodenseitiger Überstand vorgeschlagen (vgl. Abbildung 2-8), um Positionsabweichungen zu tolerieren.

Zusammenfassung: Unzureichende Überdeckung der Katalysatorschichten führt in jedem Fall zu Defekten, wobei sich diese zwischen Anoden- und Kathodenseite unterscheiden. Da dies bereits während der CCM-Herstellung erfolgt, hat die MEA-Montage darauf keinen Einfluss.

C: Position der Anoden-GDL zur Kathoden-GDL

Da es sich bei der GDL um ein im Wesentlichen flächiges, unstrukturiertes Bauteil handelt, kann davon ausgegangen werden, dass eine Verdrehung oder Verschiebung im Bereich der aktiven Fläche nicht mit Leistungseinbußen verbunden ist. Toleranzen im Kantenbereich können jedoch zu einer asymmetrischen Belastung der Membran führen, die in der Folge durch Lastwechsel zu Ermüdungserscheinungen führen kann. In (Kim, Kim & Jeon 2012) sowie (Kim, Kim & Jeon 2013B) werden als Folge unzureichender Positionierung nicht näher spezifizierte Alterungserscheinungen genannt. In (Shin & Cho 2007) wird hervorgehoben, dass bei nicht fluchtender Ausrichtung Biegespannungen induziert werden, die auch die erzielbare Leistung reduzieren.

Zusammenfassung: Fehlpositionierungen der GDL wirken sich vor allem langfristig durch Ermüdung der CCM negativ aus, deren genaue Folge ist allerdings nicht bekannt. Ohne Kenntnis des Wirkmechanismus sollte daher eine möglichst präzise Positionierung angestrebt werden.

D: Position des Subgasket zueinander

In (Stahl 2018, S. 116ff) wurde die Anodenseite einer CCM auf einer Breite von 6 mm verdeckt, was die Situation einer ungenauen Assemblierung widerspiegelt. Überprüft wurde eine Überdeckung der Anodenseite, was an der Membran zu einem Sauerstoffüberschuss führt. Eine deutliche Dickenabnahme der Membran wurde dabei festgestellt, was auf Oxidation der Kohlenstoffträger sowie Zersetzung des Ionomers zurückzuführen ist. Diesem Effekt kann jedoch entgegengewirkt werden, wenn die

anodenseitige Fläche im Vergleich zur kathodenseitigen Fläche größer ausgeführt ist (Stahl, Kraft & Götz 2016). In (Chen et al. 2022) wurde insbesondere der Randbereich einer Subgasket-verstärkten MEA untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass dieser Bereich maßgeblich die mechanische Alterung beschleunigt. Die Versuchsproben wurden dabei manuell assembled, zulässige Toleranzen wurden nicht gezielt variiert. Die Ergebnisse lassen jedoch die Schlussfolgerung zu, dass 100 µm Toleranz ertragbar sind. Die Zusammenhänge sind dabei vergleichbar mit der unzureichenden Positionierung der Katalysatorschichten zueinander (siehe B).

Zusammenfassung: Die Position der Subgaskets zueinander hat einen Einfluss auf die Langlebigkeit einer MEA, wobei dem durch ein toleranzgerechtes Design entgegengewirkt werden kann. Höhere Positioniergenauigkeiten können allerdings zu geringeren Bauteiltoleranzen, weniger Verschnitt und damit zu einer Kostenersparnis führen.

E: Position der Anoden-BPP zu der angrenzenden Kathoden-BPP

Funktionsmerkmal der Bipolarplatte ist das Flowfield, dementsprechend wird eine möglichst hohe Übereinstimmung der Fließkanäle zueinander gefordert (Hans et al. 2016, Farrington 2015). Ungenaue Positionierung der Bipolarplatten zueinander führt zu einer überhöhten Intrusion der GDL in den Flusskanal, die Strömung kann blockiert sein. In (Hoppe 2021, S. 100) wurde dabei allerdings lediglich eine Leistungsdifferenz von 4 % bei maximaler Verschiebung gemessen. Daneben kommt es noch zu einer hohen Belastung der CCM, die bis zur plastischen Verformung reichen kann. Mögliche Folgen sind Risse oder Pinholes (Hoppe et al. 2021).

In (Peng et al. 2021) wird hervorgehoben, dass bei geradlinigem Flowfield ein Versatz zunächst zu geringeren elektrischen Widerständen führt, da die Kontaktfläche zunimmt. Ebenso nimmt aufgrund der ungleichmäßigen Verpressung die Porosität der GDL ab. Dem gegenteilig nimmt die Druckverteilung, ausgedrückt in der Standardabweichung über alle Messpunkte, bei zunehmendem Versatz zu, was sich negativ auf die Belastbarkeit auswirkt. Die Kombination dieser drei Effekte führt bei einem Versatz in Summe zu Qualitätseinbußen, wobei dieser bei einer Kanalweite von 1,0 mm bis zu 0,08 mm als akzeptabel gilt. In (Liu, Peng & Lai 2010) werden Genauigkeiten von $\pm 0,111$ mm genannt. In (Lu et al. 2011) wurde ebenfalls der Effekt einer verschobenen Bipolarplatte untersucht, der Fokus dort lag jedoch auf der numerischen Bestimmung

der Belastung der Membran. Die Belastung selbst hängt stark von der verwendeten GDL ab und sinkt mit zunehmender Steifigkeit dieser. Bei idealer Ausrichtung hat die Kanalgeometrie keinen Einfluss auf die Belastung der Membran, bei unzureichender Ausrichtung hingegen wird diese davon beeinflusst. Die Spannung der Membran nimmt nochmals zu, nachdem diese einem hygrothermischen Lastwechsel unterworfen wurde. Es wird vermutet, dass eine solch erhöhte Belastung der Ausgangspunkt für Rissbildung sowie in der Folge Pinholes sein kann. In (Banan, Zu & Bazylak 2015) wurde die Belastung der Membran bei hygrothermischer Belastung ebenfalls numerisch untersucht. Ein Versatz der Kanäle von 0,1 mm zueinander hat dort zu einem doppelten Anstieg der Delamination zwischen der Katalysatorschicht und der Membran geführt.

Zusammenfassung: Die Position zweier benachbarter Bipolarplatten wirkt sich kurzfristig in einer erhöhten Intrusion aus, die zu Leistungsverlusten führt. Langfristig können unzureichend positionierte Bipolarplatten zu einer Beschädigung der CCM führen. Das funktionsrelevante Merkmal ist das Flowfield.

F: Position der Bipolarplattenhalbschalen in einer Bipolarplatteneinheit

Bei einer Fehlpositionierung der Bipolarplattenhalbschalen zueinander vor dem Schweißprozess kann es zu einer Lochbildung in Folge eines erhöhten Spaltmaßes kommen. In (Ream 2007) lag die Spaltüberbrückbarkeit bei 25 % der Blechstärke (100 µm). Bei einem gegebenen Flowfield ist somit, sofern in der aktiven Fläche geschweißt wird, die Toleranz durch den Berg-Tal Abstand bestimmt. In aller Regel kann eine Lochbildung jedoch durch eine anschließende Leckageprüfung detektiert werden, so dass dieser Fehler für das nachfolgende Stapeln keine Relevanz hat. Sofern als Referenz nicht die vorhergehende Bipolarplatte herangezogen wird, hat eine Fehlpositionierung innerhalb einer Bipolarplatte dieselben Auswirkungen wie eine Fehlpositionierung benachbarter Bipolarplatten. Als Gegenmaßnahme können während des Verschweißens Positionierungslöcher genutzt werden. Da der trennende Schritt jedoch nicht während der Umformung erfolgt, ist damit nicht stets eine exakte Ausrichtung des Flowfields zueinander gewährleistet (Gaugler & Kunz 2011). Dadurch kann es beim Laserschweißen zu einer Schädigung in Folge einer Fehlpositionierung kommen. Weiterhin kann es durch den Versatz der Dichtelemente zu einer Leckage kommen, die Strömung im Bereich des Manifold wird behindert. Die Position der

äußereren Beschnittgeometrien zur Ausrichtung ist in der Regel nicht ausreichend genau (Gehring 2022).

Zusammenfassung: Die Position der Bipolarplattenhalbschalen zueinander ist für das Fügen der Bauteile entscheidend. Daher kann bei leckagefrei gefügten Bipolarplatten von einer hohen Genauigkeit ausgegangen werden. Bei graphitischen Platten muss eine entsprechende Genauigkeit im Vorprozess sichergestellt werden.

G: Position der GDL zu der Bipolarplatte

In (Hong & Han 2011) ist der Einfluss der GDL-Orientierung zu der Bipolarplatte ausführlich diskutiert. Bedingt durch die Herstellung weist eine GDL eine Anisotropie auf, da sich die C-Fasern bevorzugt in Maschinenrichtung orientieren und infolgedessen die Biegesteifigkeit deutlich erhöht ist. Bei zu geringer Steifigkeit kommt es jedoch zu einer GDL-Intrusion, weswegen die Maschinenrichtung der GDL und die Kanäle eines Flowfields häufig um 90° zueinander verdreht sind (Baik et al. 2012). Durch diese Verdrehung lässt sich die Stromdichte und damit die Leistung bei gleichen Randbedingungen um 12 % - 15 % erhöhen. Diese Ergebnisse werden in (Han et al. 2010B) weiter ausgeführt. Da die Bipolarplatte gemäß (Hong & Han 2011) auch ein Nebenströmungsfeld aufweist, wird dort eine Verschränkung um einen Winkel zwischen 45 und 60° empfohlen. Der dadurch entstehende Verschnitt wird nicht weiter diskutiert. Gemäß (Hong et al. 2011) weisen GDL-Vliese eine höhere Biegesteifigkeit als Kohlefaserpapier auf, so dass der Effekt unterschiedlich stark ausfallen könnte. Darüber hinaus sind in (Mitsushi & Atsushi 2006) die Auswirkungen einer falsch positionierten MEA relativ zur Bipolarplatte beschrieben, wobei im Wesentlichen auf die GDL eingegangen wird. Zunächst sinkt die Leistung einer Einzelzelle, da die aktive Fläche reduziert wird. Weiterhin kann in den Randbereichen eine ausreichende Versorgung mit Medien nicht gewährleistet werden. Dies führt zu einer erhöhten Alterung der Zelle.

Zusammenfassung: Die Orientierung der GDL kann in einem Anlagenkonzept nicht frei gewählt werden, sondern ist von der Vorzugsrichtung der Fasern abhängig. Verdrehungen führen zu Intrusion und Leistungseinbußen, diese sind jedoch deutlich oberhalb der bei einer Assemblierung zu erwartenden Toleranzen.

2.6.3 Umsetzungsformen einzelner Funktionsträger

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Einfluss von Positionierfehlern auf die Qualität und Funktionsfähigkeit ausführlich beschrieben. Die Handhabung von Bauteilen der Brennstoffzelle wurde in der wissenschaftlichen Literatur bisher nicht intensiv diskutiert. Schutzrechte weisen jedoch auf die hohe industrielle Relevanz dieses Themenfeldes hin. Die durchgeführte Recherche fokussiert sich im Wesentlichen auf die IPC-Gruppe (International Patent Classification) H01M8/2404 „*Processes or apparatus for grouping fuel cells*“. Soweit verfügbar wird auf die deutschen Anmeldungen des Schutzrechtes verwiesen, falls nicht verfügbar wird auf eine englischsprachige Veröffentlichung oder die ursprüngliche Veröffentlichung zurückgegriffen. Zur übersichtlicheren Darstellung wurden die Schutzrechte und die wissenschaftliche Literatur nach Ausprägungsmerkmalen in der Greiftechnik, der Ausrichtung sowie eventuell zusätzlicher Sensorik gruppiert. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf der Herstellung des Stacks, insbesondere dem Stapeln im aktiven Bereich (vgl. Abbildung 2-1). Nicht berücksichtigt werden Medienmodul, Endplatte, Stromsammler sowie das nachfolgende Verspannen des Stacks. Die erfassten Ausprägungen orientieren sich dabei an der in VDI 2860 beschriebenen Methodik zur Beschreibung von Handhabungsaufgaben anhand verschiedener Elementarfunktionen (VDI 1990).

Die im Stand der Technik identifizierten verschiedenen Ausprägungen der Funktionsträger dieser Elementarfunktionen sind in Abbildung 2-9 in Form eines morphologischen Kastens dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass sich nicht sämtliche Realisierungsformen miteinander kombinieren lassen.

Teilfunktion		Technische Lösung / Funktionsträger			
Orientierung prüfen	Position prüfen	optisch		mechanisch	
		vor dem Greifen		nach dem Greifen	
		<i>anhand von ...</i>			
		Referenzmerkmal		Funktionsmerkmal	
Drehen = Schwenken	Verschieben	Schieber		Verwendung des Handhabungs-Systems	
		schräge Ebene			
Halten		Vakuum	Bernoulli	Elektrostaticisch	
Weitergeben		Portal-system	SCARA Roboer	Knick-arm-roboter	
				Rundtakttisch	

Abbildung 2-9 Elementarfunktionen im Stand der Technik

2.6.3.1 Ausrichtung

Wie in Kapitel 2.6.2 dargestellt führt eine Fehlpositionierung zu verminderter Leistung oder reduzierter Lebensdauer. Eine exakte Positionierung ist daher in jedem Fall sicherzustellen. Zunächst lässt sich zwischen einer optischen sowie einer mechanischen Prüfung von Position und Orientierung unterscheiden. Eine optische Ausrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass durch ein optisches System ein charakteristisches Merkmal am Bauteil erfasst wird. Die Position dieses Merkmals wird einer Steuerung übergeben, die entsprechende Korrekturmaßnahmen einleitet.

Im vorliegenden und im weiteren Verlauf diskutierten Stand der Technik wurde identifiziert, dass die Prüfung der Position und Orientierung sowohl vor dem Greifen als auch nach dem Greifen erfolgen kann. Zuletzt werden verschiedene Merkmale zum Ausrichten der Bauteile verwendet. Dies können Funktionsstrukturen, beispielsweise

das Flowfield der Bipolarplatte, oder nicht funktionserfüllende Referenzen sein. Nicht funktionserfüllende Referenzen können bauteilinhärent vorhanden sein, so beispielsweise eine Bauteilkante, oder nachträglich eingebracht werden, beispielsweise eine Referenzbohrung. Ferner konnten für das Drehen sowie das Verschieben der Bauteile die technischen Realisierungsformen eines Schiebers sowie einer schrägen Ebene identifiziert werden. Als Schieber wird im Folgenden eine Konstruktion bezeichnet, die:

- eine externe, steuerbare Kraft auf das Bauteil in Richtung der Positions korrektur auf bringt
- das Bauteil an ein festes Gegenlager schiebt
- die Orientierung am Einzelbauteil vor der Ablage herstellt

Eine schräge Ebene ist charakterisiert durch:

- eine von der Gravitationsrichtung abweichende Stapelrichtung
- ausschließlichen Nutzen der Gravitationskraft zur Ausrichtung gegen eine in Stapelrichtung orientierte Schiene
- Herstellen der Orientierung nach der Ablage

Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über technische Umsetzungsformen zum Orientieren der Bauteile Bipolarplatte oder MEA in der Brennstoffzellenfertigung, sowohl aus der Patentlage als auch aus der Literaturanalyse. Über die Umsetzungsform hinaus werden weiterhin Herausforderungen adressiert, die nachfolgend näher beschrieben werden sollen.

Tabelle 2-2 Umsetzungsformen zum Ausrichten im Stand der Technik

Quelle	Ausprägung	Merkmal
(Andreas-Schott & Ritter 2014)	Mechanisch	Manifold
(Arell, Flink & Lydhig 2021)	Mechanisch	Referenzbohrung
(Bobka, Gabriel & Dröder 2020)	Optisch, Kamera	Außenkante
(Dang 2022)	Optisch, Kamera	Referenz, geformt
(Deutsch et al. 2016)	Optisch, Kamera	Referenz, aufgedruckt
(Fukaya 2010)	Optisch, Kamera	Referenz, gelasert
(Furukawa & Usui 2009)	Mechanisch	Schräge Ebene
(Gallagher 2015)	Mechanisch	Außenkante
(Gaugler & Kunz 2011)	Mechanisch	Referenz, Nut
(Hans et al. 2016)	Optisch, Zeilenkamera	Flowfield
(Horinek et al. 2020)	Optisch, Kamera	Manifold
(Itoh, Abe & Ohnuma 2008)	Mechanisch	Referenzbohrung
(Kuramochi et al. 2005)	Optisch, Kamera	Referenz, aufgedruckt
(Maier 2021)	Mechanisch	Referenzbohrung
(Munthe 2021A)	Mechanisch	Referenz, Feder
(Park et al. 2019)	Mechanisch	Manifold
(Watanabe 2018)	Mechanisch	Referenz, Nut

In (Gallagher 2015) wird hervorgehoben, dass eine mechanische Ausrichtung an den Kanten einer Bipolarplatte insbesondere bei geringen Materialstärken zu einer Deformation und folglich zu einem Kurzschluss führen kann und sie dahingehend ungeeignet sind, um eine Orientierung durchzuführen. Es wird vorgeschlagen, dass die Bipolarplatte mit Ausrichtelementen daher bei jedem zweiten Stapschritt verdreht abgelegt wird. Somit entspricht der Abstand zweier Ausrichtelemente dem doppelten Zellpitch. Dies schränkt die Designfreiheit allerdings ein und kann aufgrund der notwendigen Symmetriewangsbedingung zu geringeren Leistungsdichten führen. In (Andreas-Schott & Ritter 2014) wird ebenfalls eine mögliche Deformation der Bipolarplatte hervorgehoben, weiterhin wird festgestellt, dass eine MEA dafür ebenfalls ungeeignet ist, da es zur Faltenbildung kommen kann. In (Maier 2021) werden ebenfalls große Fertigungstoleranzen der Bipolarplatte sowie die biegeschlaffe MEA als Herausforderung adressiert, weiterhin wird hervorgehoben, dass die MEA größer als

die Bipolarplatte dimensioniert ist, um einen Kurzschluss zu vermeiden (Walter, Benkenstein & Stanik 2021; Hackenberg, Diessner & Betzitzka 2021).

Als wesentliche Herausforderungen einer kameraoptischen Ausrichtung werden höhere Kosten und hohe Prozesszeiten in Form von Nebenzeiten genannt (Hackenberg, Diessner & Betzitzka 2021). In (Fukuya 2010) wird darüber hinaus ausgeführt, dass eine optische Erfassung im Vergleich zu einem Durchdringungsstift eine höhere Genauigkeit aufweist. Der Durchdringungsstift bringt darüber hinaus die Gefahr einer Deformation mit sich. In (Mitsushi & Atsushi 2006) wird hervorgehoben, dass sich die Kante einer metallischen Bipolarplatte gegebenenfalls nicht zur Ausrichtung eignen kann, da diese in Folge des Umform- und Trennprozesses toleranzbehaftet ist. Ferner besteht die Gefahr der Verbiegung der Kanten. Fertigungstoleranzen an der Ausrichtkante führen direkt zu einer Fehlpositionierung des Bauteilmittelpunktes. Weiterhin stellt die reine Bauteilkante bei einigen Bauteilen keine geeignete Referenz dar, da sie nicht funktionsrelevant ist. Beispielsweise wird die äußere Kontur im Falle des Fertigungsverfahrens des Hydroformings erst in einem nachfolgenden Schritt ausgearbeitet, wodurch es zu einer weiteren Toleranzverkettung zwischen dem Flowfield als funktionskritischem Merkmal und der Kante kommen kann.

In (Gaugler & Kunz 2011) wird für das Laserschweißen ebenfalls dargestellt, dass Positionierlöcher keine ausreichend hohe Genauigkeit aufweisen, insbesondere dann, wenn die Positionierlöcher gemeinsam mit anderen trennenden Schnitten sowie dem Beschnitt durchgeführt werden. Als Resultat wurde ein Versatz der Kanalgeometrien beobachtet.

Weiterhin ist im Bereich der MEA das Ausarbeiten der Kantenstruktur mit einem Werkzeugverschleiß verbunden, der direkte Auswirkung auf erzielbare Genauigkeiten hat, wie in (Deutsch et al. 2016) dargestellt.

Graphitische Platten weisen in der Regel an der Bauteilkante Ausformschrägen auf (Dang 2022). Diese lassen sich daher nur bedingt mechanisch ausrichten, da es durch das spröde Verhalten der verringerten Auflagefläche zu einer Bauteilbeschädigung kommen kann (Dang 2022). Ein mechanisches Ausrichten einer graphitischen Bipolarplatte wird somit ausgeschlossen.

Nachfolgend werden die in der Literatur beschriebenen brennstoffzellenspezifischen Umsetzungsformen einer ergänzenden fertigungstechnischen Betrachtung unterzogen.

Diskussion zur Toleranzverkettung bei einer Kantenausrichtung der Bipolarplatte durch Betrachtung der Vorprozesse

Die Außenkante einer metallischen Bipolarplatte wird im Fall eines Folgeverbundwerkzeuges direkt im Werkzeug nach Ausformung der Struktur hergestellt. Durch Feinschneiden lässt sich nach (Demmel & Hoffmann 2015, S. 241) eine Toleranzklasse zwischen IT 6 und IT 9 erreichen, (Klocke 2018, S. 537) nennt IT 7. Bezogen auf übliche Maße der längsten Abmessung der Brennstoffzelle (>400...500 mm nach DIN ISO 286) entspricht dies bereits zwischen 40 µm und 155 µm (DIN 2019). Neben der Werkzeuggenauigkeit ist auch die Vorschubgenauigkeit des Metallbandes relevant. Hohe Genauigkeiten lassen sich durch Walzen-Zangen-Vorschübe mit Suchstiften erreichen und liegen bei $\pm 0,01$ mm (Kolbe & Hellwig 2018, S. 82). Wird alternativ das Hydroforming verwendet, so erfolgt das Ausformen der Kanäle und das Austrennen in zwei verschiedenen Maschinen, wodurch ebenfalls mit einer erhöhten Toleranz zwischen dem Flowfield und einer Außenkante zu rechnen ist.

Die Ausrichtung einer metallischen Platte anhand einer Außenkante führt damit indirekt zu erhöhten Werkzeugkosten in der Herstellung der Bipolarplatte und schränkt das zur Verfügung stehende Toleranzfenster für den eigentlichen Stapelprozess stark ein. Weiterhin geht dies damit einher, dass ein unvermeidlicher Werkzeugverschleiß direkte Auswirkungen auf die spätere Stapelgenauigkeit hat.

Diskussion zur Eignung biegeschlaffer Bauteile zur mechanischen Ausrichtung

Sämtliche Bauteile in der Wiederholeinheit einer Brennstoffzelle stellen flächige Bauteile dar, deren Positionsfehler auf eine Verschiebung in x und y sowie einer Rotation um die z-Achse beschränkt sind (Götz 1991).

Bei der mechanischen Ausrichtung wirken im Wesentlichen zwei Kräfte: Die Reibkraft zwischen Bauteil und Oberfläche sowie die durch den Schieber aufgebrachte Kraft. Ein Ausrichten kann dann erfolgen, wenn die Ausrichtekraft die Reibkraft übersteigt, ohne jedoch dass es dabei zu einem Knicken des Bauteils kommt. Der Schieber soll dabei als gelenkig gelagerter Stab angenommen werden, was dem zweiten Euler'schen Knickfall entspricht (siehe Formel 2-2)

$$F_r = V * \rho * g * \mu = L * B * d * \rho * g * \mu \quad \text{Formel 2-2}$$

$$P_{Kr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 E d^3 B}{12 L^2}$$

$$P_{Kr} > F_r \text{ bzw. } \frac{P_{Kr}}{F_r} > 1$$

Mit $E = 5 \text{ GPa}$, $\rho = 1,36 \text{ g/cm}^3$ sowie einer angenommenen Länge von 100 mm sowie einem Reibwert von $\mu = 0,3$ ergibt sich für den Subgasket eine kritische Dicke von 180 μm , was oberhalb der üblichen Stärke des Subgasket liegt (siehe Kapitel 2.6.1.4). Folglich kann eine Ausrichtung der biegeschlaffen Bauteile nicht mechanisch erfolgen. In (Götz 1991, S. 131) werden Ausgleichselemente für flächige Bauteile ebenfalls als zumeist nicht möglich dargestellt. In (Ju & Jang 2016A) wird dem beispielsweise damit begegnet, dass die Ausrichtung auf einem Luftkissen erfolgt.

Bewertung des Stands der Technik: Im Stand der Technik und Forschung werden beide Möglichkeiten der Ausrichtung, optisch sowie mechanisch, diskutiert. Herausforderungen bei der mechanischen Ausrichtung sind eine auftretende Toleranzverkettung sowie die Gefahr der Bauteilbeschädigung. Weiterhin kann es, abhängig von den verwendeten Materialien, zu mangelnder Genauigkeit durch Knicken kommen, weswegen optische Methoden zur Positionsbestimmung bevorzugt werden. Im Stand der Technik und Forschung wird darüber hinaus ausführlich auf die Notwendigkeit einer präzisen Ausrichtung der einzelnen Bauteile eingegangen (siehe Abschnitt 2.6.2). Dennoch geschieht die Ausrichtung der Bauteile zumeist nicht funktionsbezogen anhand von zusätzlichen inhärenten oder eingebrachten Positionierreferenzen. Positionierreferenzen verursachen enge Toleranzen an nicht funktionsrelevanten Merkmalen der Bauteile, wodurch die Fertigungskosten erhöht werden. Weiterhin sind Positionierreferenzen herstellerspezifisch und erfordern daher angepasste Maschinenkonzepte in der Stapelung. Dies hat Anpassungsaufwände zur Folge, die die Maschinenkosten erhöhen.

2.6.3.2 Greiftechnik

Ausprägungsformen der verwendeten Greiftechnik zur Stapelbildung von Brennstoffzellenstacks im Stand der Technik und Forschung sind in Tabelle 2-3 aufgelistet. In der Greiftechnik sind hauptsächlich Vakuumgreifer anzutreffen. Diese haben den Vorteil, dass sie ein großes Teilespektrum abdecken können. Unter anderem aufgrund einer reinigenden Wirkung sind Flächengreifer beispielsweise in der

Batteriezellfertigung ebenfalls verbreitet (Fröhlich et al. 2018). In (Munthe 2021B) wird hervorgehoben, dass Vakuumgreifer dünne Bauteile und damit die CCM beschädigen können.

Tabelle 2-3 Umsetzungsformen zum Spannen und Halten

Quelle	Greifer
(Cho & Lee 2018)	Vakuum, flächig sowie Bernoulli-Greifer
(Ju & Jang 2016B)	Vakuum, flächig
(Kim 2010)	Vakuum, flächig
(Lee 2010)	Vakuum
(Lee, Park & Cho 2016)	Vakuum
(Munthe 2021B)	Vakuum
(Park & Chi 2010)	Vakuum
(Yoshida et al. 2006)	Vakuum sowie elektrostatisch

Der in (Cho & Lee 2018) verwendete Bernoulli-Greifer dient primär der Vereinzelung, nicht dem Greifvorgang. Der eigentliche Greifvorgang wird durch einen konventionellen Vakuumflächengreifer realisiert. Da Bernoulli-Greifer keine oder nur geringe Querkräfte erzeugen, sind diese nicht dazu in der Lage Positionierung und Orientierung eines Bauteils in der gewünschten Genauigkeit aufrecht zu erhalten. Weiterhin werden Werkstücke zum Schwingen angeregt, was im Fall einer GDL oder MEA zum Herauslösen von Fasern führen kann, was insbesondere unter Reinraumbedingungen nachteilig ist (Kuolt & Müller 2014).

Zusammenfassung: Aufgrund vielfältiger Vorteile finden vorrangig Vakuumgreifer Anwendung in der Brennstoffzellenfertigung. Für die Wechselwirkungen zwischen den Produkten und Handhabungsvorrichtungen liegen jedoch keine Beschreibungen vor.

2.6.3.3 Manipulator

In Tabelle 2-4 sind Umsetzungsformen des Handhabungssystems aus Schutzrechten sowie wissenschaftlichen Veröffentlichungen genannt. Darüber hinaus existieren noch weitere Umsetzungsformen in Schutzrechten, die sich durch starke Integration nicht in

die hier getroffene Kategorisierung einordnen lassen und deren technische Offenbarung gering ist. Zu nennen sind hier insbesondere teilkontinuierliche Prozesse, die ohne eigentlichen Manipulator auskommen. In (Rückert & Schuhmacher 2017) sowie (Königer & Jakobs 2022) wird durch ein Förderband ein Stapelrad oberseitig bestückt, das an der Unterseite über einen festen Anschlag die Stapelbildung übernimmt. Derartige Konstruktionen finden beispielsweise in Zählmaschinen für Banknoten bereits breite Anwendung. Aufgrund der in Kapitel 2.6.2 aufgeführten Anforderungen an die Genauigkeit sowie den in Kapitel 2.6.3 bereits diskutierten Einschränkungen zur Erreichung derselben ist davon auszugehen, dass eine derartige Prozessführung die Anforderungen nicht erfüllt.

Tabelle 2-4 Umsetzungsformen zum Weitergeben der Bauteile

Quelle	Manipulator
(Bobka, Gabriel & Dröder 2020)	Scara
(Ju & Jang 2016B)	Portalsystem
(Kim 2010)	Portalsystem
(Konold, Muminovic & Werheim 2008)	Knickarmroboter
(Lee 2010)	Portalsystem, Rundtakttisch
(Lee, Park & Cho 2016)	Roboter
(Munthe 2021B)	Roboter, Rundtakttisch
(Park & Chi 2010)	Portalsystem
(Porstmann, Wannemacher & Richter 2019)	Knickarmroboter

In der Brennstoffzellenfertigung werden vielfältige Manipulatoren eingesetzt, beispielsweise Portalsysteme, Knickarm- oder Scara-Roboter, teilweise auch in Kombination mit Rundtaktschaltern. Die Wahl des Manipulators ist dabei nicht frei, sondern steht in Wechselwirkung mit der verwendeten Art der Orientierungsbestimmung. Wird beispielsweise auf einer schrägen Ebene gestapelt, so können aufgrund des fehlenden Freiheitsgrades keine Portalsysteme oder Scara-Roboter eingesetzt werden. Weiterhin erfordern Portalsysteme, dass die Bauteile bereits vor dem Greifen ausgerichtet sind, da diese in der Regel keinen rotativen Freiheitsgrad aufweisen.

Zusammenfassung: Die Stapelung der Brennstoffzelle geschieht im Pick & Place-Verfahren, wobei vielfältige Manipulatoren eingesetzt werden. Dabei wird größtenteils auf vorhandene Baugruppen oder Systeme zurückgegriffen. Durch den Einsatz von Standardkomponenten kann insbesondere bei kleineren Stückzahlen eine Wirtschaftlichkeit gewährleistet werden.

2.6.4 Umsetzungsformen in anderen Branchen

Aufgrund beschränkter Nachfrage handelt es sich bei der Brennstoffzelle um ein Produkt, das bisher nur durch wenige Hersteller industriell und automatisiert gefertigt wird. Anhand anderer Branchen sollen weitere Erkenntnisse abgeleitet werden. Vorrangig werden solche Produktionsprozesse betrachtet, bei denen ebenfalls flächige, zum Teil biegeschlaffe Bauteile gehandhabt werden müssen.

Elektroadhesive Greifer wurden in (Defraneceski 2020) zur Handhabung von Blechteilen untersucht, wobei die Handhabung strukturierter Bauteile als nicht prozesssicher bewertet wurde. Daher ist nicht davon auszugehen, dass sich dieses Greifprinzip zur Handhabung der Bipolarplatte eignet.

Ferner sind zahlreiche Veröffentlichungen zur Handhabung von Ausgangsprodukten der CFK-Herstellung bekannt, wobei jedoch eine möglichst präzise Handhabung der Bauteile nicht im Vordergrund steht. In (Förster 2016) wird die Ansaugkraft beim Greifen von Faserhalbzeugen näher untersucht. Es wird eine Sensorik entwickelt, die dazu in der Lage ist, die Ansaugkraft während des Handhabungsprozesses zu erfassen und dadurch eine Regelung zu ermöglichen. In (Fischmann 2014) wurde der Handhabungsprozess in der Photovoltaikindustrie näher beschrieben und verschiedene Greifer wurden qualifiziert. In einer statistischen Versuchsdurchführung wurde dabei unter anderem die Wiederholgenauigkeit im Pick & Place der dünnen, spröden Wafer beleuchtet (Fischmann 2014, S. 140). Diese lagen, abhängig von der Parametereinstellung, zwischen 128 µm und 1569 µm für einen Flächengreifer in Wechselwirkung mit den Bauteilen. Weitere Untersuchungsmerkmale, beispielweise die Schwingung des Bauteils, sind durch unterschiedliche Materialeigenschaften nicht auf den Anwendungsfall der Brennstoffzelle übertragbar.

In (Straßer 2011, S. 160f.) wurden Genauigkeiten beim Greifen von technischen Textilien untersucht. Ermittelte Genauigkeiten wurden allerdings nur auf den Gesamtprozess aus Zuschnitt, Greifen und Ablegen bezogen. Eine Betrachtung auf Einzel-

prozesse und deren quantitativen Einfluss hat nicht stattgefunden. Bei einer geforderten Genauigkeit von ± 1 mm wurden Standardabweichungen in der Ablageposition von 0,16 mm bzw. 0,22 mm in die Raumrichtungen beobachtet.

In (Götz 1991) wird ferner eine Methodik zur automatisierten Verarbeitung flächiger und biegeschlaffer Halbzeuge dargestellt, die zunächst nicht bauteilspezifisch ist und deren Handlungsempfehlungen sich auf Bauteile der Brennstoffzelle übertragen lassen. Nachfolgend werden die zentralen Erkenntnisse mit Relevanz für die Brennstoffzellenfertigung diskutiert. Folien können bereits bei geringen Differenzdrücken zur Verwölbung neigen (Götz 1991, S. 34), rechteckförmige Saugflächen bieten dabei im Vergleich zu runden Saugöffnungen den Vorteil einer geringeren Beanspruchung bei gleichbleibender Haltekraft. Der betrachtete Fall ist insbesondere für die Handhabung der CCM relevant.

Randspalte, beispielsweise durch überhängende Bauteile, können bei Flächengreifern zu Randspaltbildung und einem Ablösen des Bauteils führen (Götz 1991, S. 65). Solche Randspalte können entstehen, wenn der Bauteilrand über den Greifer hinausragt und das Bauteil eine hohe Gewichtskraft aufweist. In der Brennstoffzelle kann dies beispielsweise beim Einsatz einer GDL mit Dichtung (Seal-on GDL) gegeben sein. Weiterhin kann es zu Randspalten kommen, wenn ein Bauteil durch Eigenspannungen der ebenen Greiffläche entgegenwirkt. Insbesondere für den Bauteilverbund der MEA kann dies unter wechselnden atmosphärischen Bedingungen gegeben sein. Weiterhin kann es bei metallischen Bipolarplatten unter Eigenspannung durch Umformen und Laserschweißen zu Randspaltbildung kommen.

Wird das Vakuum des Flächengreifers erst nach erfolgter Annäherung aktiviert, so verhindert dies Lagefehler zwischen dem Bauteil und dem Greifer, es kann allerdings zu einer Verschiebung kommen (Götz 1991, S. 77). Als wesentliche Einflussfaktoren in Hinblick auf erzielbare Genauigkeiten werden Bauteilgewicht, Volumenstrom sowie der Abstand von Greifer und Bauteil genannt (Götz 1991, S. 78). Bei bereits erfolgter Vakumerzeugung während des Annäherns hingegen kann die Prozesszeit minimiert werden, die Flugphase, insbesondere bei leichten Bauteilen, kann jedoch zu deutlichen Lagefehlern führen. Bei Annäherung zum Bauteil kommt es zu einem sprunghaften Anstieg des Unterdrucks, sodass der Prozess sensibel auf Schwankungen und Unregelmäßigkeiten in z-Richtung reagiert. Aufgrund der Druckluftverteilung wird weiterhin empfohlen, die Greiffläche größer als das Bauteil auszulegen, um Randeffekte und Inhomogenität der Druckdifferenz zu vermeiden. Aus diesen

Zusammenhängen heraus wird ein schräges Aufsetzen des Greifers für eine möglichst geringe Lageverschiebung empfohlen (Götz 1991, S. 86). Eine vollständig parallele Annäherung kann ferner dazu führen, dass es durch Differenzdruckmaxima im Randbereich zu einer mittigen Faltenbildung flächiger, biegeschlaffer Bauteile kommen kann (Götz 1991, S. 88). Unvermeidliche Positionsabweichungen bei flächigen Halbzeugen lassen sich häufig ausschließlich mittels Sensoren detektieren (Götz 1991, S. 133), wobei eine Befestigung des Sensors am Roboter sowie stationär als möglich erachtet wird (Götz 1991, S. 135). Die in (Götz 1991) erläuterten Zusammenhänge bieten somit ein Erklärungsmodell für mögliche Abweichungen der angestrebten präzisen Bauteilposition. Durch den auf den Greifer fokussierten Ansatz ist jedoch nicht bekannt, welche Bauteileigenschaften dieses Verhalten maßgeblich hervorrufen. Weiterhin liegt keine quantifizierte Beschreibung vor.

In (Raatz et al. 2012, S. 458) sind Möglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung der verwendeten Handhabungstechnik adressiert und klassifiziert. Zum einen kann die Genauigkeit über sensorgeführte kinematische Strukturen gesteigert werden, zum anderen über ultrapräzise Maschinenelemente. Diese Maschinenelemente müssen nicht zwangsläufig in dem eigentlichen Aktuator liegen, sondern können auch in einer präzisen Peripherie münden.

Produktionsanlagen in der Lithium-Ionen Batteriezellfertigung weisen ebenfalls eine hohe Ähnlichkeit hinsichtlich der Anforderungen zur Brennstoffzellenfertigung auf. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt in (Weinmann 2022, S. 46ff). Dabei kann in der Stapelung von Anode und Kathode eine Analogie zu der Stapelung von MEA und Bipolarplatte gesehen werden. Der für eine Batteriezelle notwendige Separator als drittes Bauteil in Rollenform entfällt dabei in der Brennstoffzellenfertigung. Durch eine bereits erfolgte hohe Marktdurchdringung haben sich einige Konfigurationen von Maschinenelementen verfestigt. Im Folgenden wird auf die wesentlichen Kernelemente des in Abbildung 2-10 dargestellten schematischen Aufbaus eingegangen.

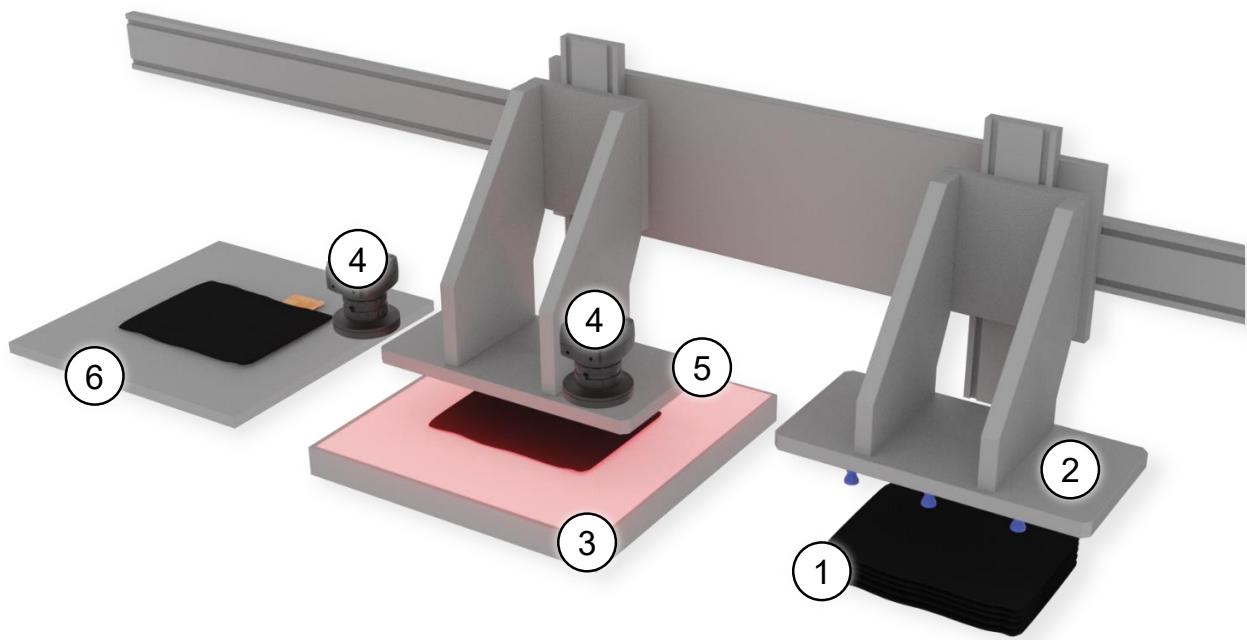


Abbildung 2-10 schematische Darstellung des z-Faltens

Die Materialbereitstellung erfolgt entweder über Magazine (1) oder über Vakuumbänder nach zuvor erfolgtem Zuschnitt. Das Einzelsheet wird zunächst mittels eines Greifers mit Vakumsaugern (2) auf einer Ausrichteinheit (3) abgelegt. Diese Ausrichteinheit ist rückseitig beleuchtet, sodass Kameras (4) die Bauteilkante erfassen können. Weiterhin lässt sich der Tisch mit Vakuum beaufschlagen. Fehlpositionierungen werden durch entsprechend entgegengerichtete Bewegungen des Kreuztisches (3) ausgeglichen. Nach dem Ausrichten wird das Bauteil anschließend mit einem Vakuumflächengreifer (5) auf dem Stapel (6) abgelegt. Die Greifer (2) und (5) können kinematisch gekoppelt sein und weisen zwei Freiheitsgrade auf. Hier dargestellt sind Portalsysteme. Sofern ein Drehen des Bauteils nach der Bereitstellung erforderlich ist, sind auch SCARA-Roboter anzutreffen. Nicht dargestellt ist die spiegelsymmetrische Bereitstellung der Kathode sowie die Einheit zum z-Falten inklusive der Finger zur Bauteilfixierung in (6). (Weinmann 2022, S. 46ff)

Wesentliche funktionserfüllende Merkmale lassen sich auf die Brennstoffzellenfertigung übertragen. So werden Flächengreifer dann eingesetzt, wenn eine exakte Positionierung erforderlich ist. Ein weiteres Merkmal betrifft die Ausrichtung sowie die Positionsdetektion des Bauteils. Diese erfolgt in einem gespannten Zustand mit einer definierten Beleuchtung. Alternative Umsetzungsformen mit mechanischen Schiebern statt des mit (3) dargestellten Kreuztisches sind ebenfalls anzutreffen. Stapelzeiten

unterhalb einer Sekunde werden erreicht. Höhere Durchsätze können durch Anlagen mit mehreren Stapelstationen erreicht werden, wobei deren Kopplung über ein gemeinsames Förderband erfolgt. Dies ermöglicht geringe effektive Stapelzeiten bei gleichzeitig kompakter Bauform. Da die Brennstoffzelle mit der Bipolarplatte ein biegesteifes Bauteil aufweist, lässt sich die Verwendung eines Greiffingers als Niederhalter nicht derart umsetzen, dass die Bauteile zu jeder Zeit gespannt sind.

In (Fröhlich, Masuch, & Dröder 2022) wurde die Wiederholgenauigkeit der Aufnahme und Ablage von Lithium-Elektroden einer Feststoffbatterie untersucht. Es wurden, vergleichbar zur Brennstoffzelle, Flächengreifer eingesetzt, die Aufnahmehöhe sowie die Ablagehöhe wurden variiert. Das Bauteil wurde aufgenommen, lateral bewegt sowie verdreht und anschließend abgelegt, im Anschluss daran wurde die Wiederholgenauigkeit bestimmt. Es hat sich gezeigt, dass die Wiederholgenauigkeit der Bauteilablage um etwa eine Größenordnung höher ist als die Wiederholgenauigkeit des eigentlichen Handhabungssystems. In (Mayer & Fleischer 2021) wird ein Simulationsmodell zum Einfluss der Welligkeit von Batterieelektroden auf die Stapelgenauigkeit vorgestellt, wobei ein Hauptaugenmerk auf dem Einfluss der Niederhalter liegt.

Handelt es sich um eine rollenweise Verarbeitung des Materials, so können in der Druckbranche Anleihen genommen werden. Von Interesse sind bei Einsatz in der Brennstoffzellenfertigung insbesondere erreichbare Zuschnittgenauigkeiten. Die Angabe erfolgt zumeist als sogenannte Registergenauigkeit. Übliche Werte bei einem 95 % Konfidenzintervall sind Toleranzen zwischen Druck und Zuschnitt von $\pm 0,2$ mm in Maschinenrichtung³. Reine Zuschnittgenauigkeiten werden mit 15 μm angegeben⁴.

2.7 Bewertung des Stands der Technik und Forschung

Der Stand der Technik, insbesondere die angemeldeten Schutzrechte, zeugt von der hohen Relevanz des Stapelprozesses bei der Brennstoffzellenfertigung. Zahlreiche Herausforderungen werden dabei adressiert, wobei diese sich meist auf mögliche Fehler der Assemblierung und deren Auswirkung auf die Funktion beziehen.

³ https://www.heidelberg.com/global/media/en/global_media/products___flexo_print/pdf_55/heidelberg_fcl_datasheet.pdf, zuletzt abgerufen: 03.08.2023

⁴ <https://www.koenig-bauer.com/de/produkte/sheetfed/postpress/rotationsstanze/>, zuletzt abgerufen: 03.08.2023

In der **Greiftechnik** werden vorrangig Vakuumgreifer eingesetzt, zumeist flächig ausgeführt. Dies bringt Vorteile hinsichtlich der technischen Sauberkeit sowie der Präzision mit sich.

Die Möglichkeiten zur **Ausrichtung** der Bauteile sind vielfältig gelöst, wobei einige Umsetzungsformen ein angepasstes Produktdesign erfordern. Mechanische Methoden sind einfach in der Umsetzung, die Ausrichtung geschieht aber zumeist nicht nach Funktionsmerkmalen, weiterhin wird das Ergebnis durch geometrische Toleranzen stark beeinflusst. Als wesentliches Qualitätsmerkmal in der Stapelung eines Brennstoffzellenstack wurde die Ausrichtung zweier benachbarter Bipolarplatten identifiziert.

Sämtliche Realisierungsformen von **Manipulatoren** sind anzutreffen, wobei eine Wechselwirkung zu der verwendeten Methode der Ausrichtung besteht. Im Wesentlichen wird im Stand der Technik auf bestehende Teilsysteme zurückgegriffen.

Insbesondere offenbart der betrachtete Stand der Technik nicht die auftretenden Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen und dem Handhabungssystem. In der wissenschaftlichen Literatur ist der Sachverhalt für angrenzende Themenfelder, beispielsweise aus der Batteriezellfertigung sowie aus der Photovoltaikindustrie, in Grundzügen beschrieben. Es bedarf allerdings einer weiteren Eingrenzung und Quantifizierung der Einflussfaktoren, um wesentliche Stellhebel zu identifizieren.

Weiterhin ist dem Stand der Technik zu entnehmen, dass zwingend eine hohe Genauigkeit der Ausrichtung zu erreichen ist. Vorgestellte Maßnahmen bedingen jedoch zumeist eine Anpassung der Bauteile durch gezielte Einbringung von Ausrichtungsmerkmalen.

Forschungsdefizit: Dem Stand der Forschung ist nicht zu entnehmen, was die **Genauigkeit einzelner Ablagevorgänge** beim Stapeln eines Brennstoffzellenstacks beeinflusst. Weiterhin wird auf die Bedeutung der Genauigkeit der Ausrichtung des Flowfields zweier benachbarter Bipolarplatten hingewiesen, es werden allerdings **nur in begrenztem Umfang Umsetzungsformen genannt, die eine direkte Messung ermöglichen**. Im Stand der Forschung und Technik sind primär indirekte Messungen über andere Bezugspunkte genannt.

3 Zielstellung und Vorgehensweise

3.1 Zielstellung

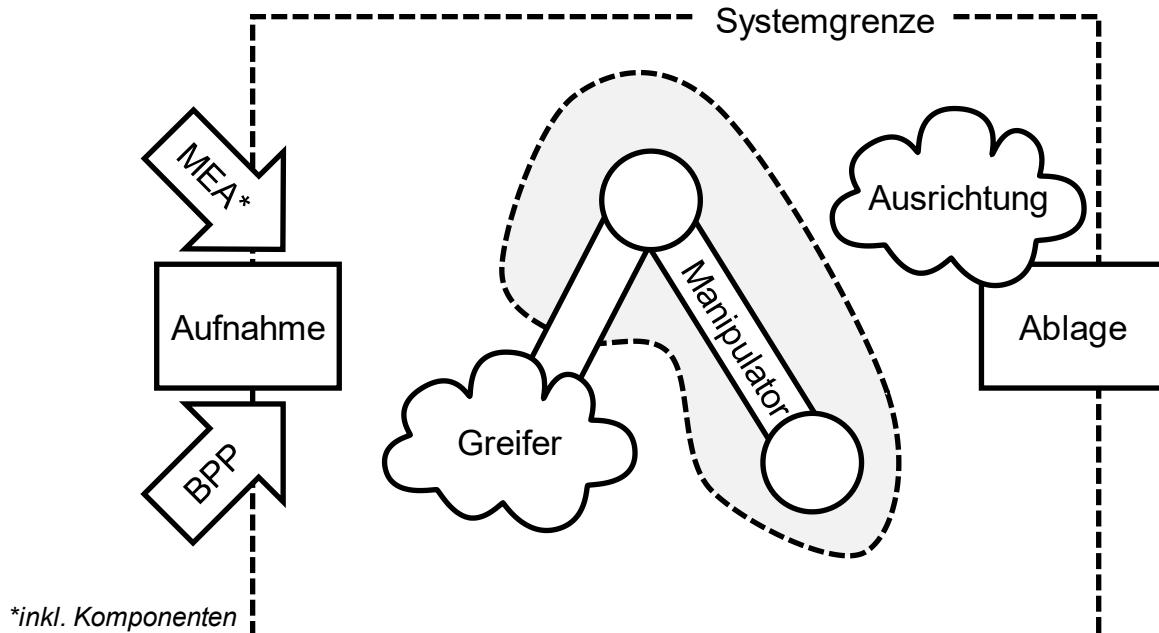


Abbildung 3-1 Systemgrenzen der Betrachtung

Abbildung 3-1 zeigt schematisch die Teilelemente sowie die Systemgrenze der Betrachtung. Teilsysteme sind der Greifer, der Manipulator sowie eine Einheit zum Ausrichten der Bipolarplatte. Greifer, Manipulator sowie die Ausrichtung liegen innerhalb der Systemgrenze und bilden das Gesamtsystem ab. Zu den vor- und nachgelagerten Prozessen existieren folgende Schnittstellen, über die Informationen sowie Bauteile ausgetauscht werden:

- Aufnahme der Bauteile (BPP): Die Bipolarplatte wird in einem Magazin bereitgestellt, die z-Position der Bauteilaufnahme ist bekannt, nicht jedoch die x- und y-Position in der erforderlichen Genauigkeit. Innerhalb der Systemgrenzen ist eine Ausrichtung notwendig.
- Aufnahme der Bauteile (MEA): Die MEA wird bereits vereinzelt bereitgestellt. Die Position des Bauteils ist in ausreichender Genauigkeit bekannt.
- Kompression des Stacks: Im Anschluss an die Stapelung wird der Stack komprimiert und verspannt. Die entsprechend notwendige Vorrichtung hierzu liegt außerhalb der Systemgrenze. Schnittstelle ist die Ablage eines Bauteils (BPP, MEA) auf einer bekannten Ablageposition.

Nachfolgende Eingrenzungen wurden durch die Auswertung des Stands der Technik bereits berücksichtigt:

- Die Ausrichtung des Flowfields einer Bipolarplatte hat wesentlichen Einfluss auf die qualitativen Eigenschaften eines Brennstoffzellenstacks. Die Bipolarplatte wiederum besteht aus zwei Halbschalen, die gefügt, gereinigt und beschichtet werden. Es kann nicht von einer hinreichend genauen Bereitstellung der Komponente ausgegangen werden.
- Die Positioniergenauigkeit der Komponenten innerhalb einer MEA kann, beispielsweise durch Optimierung und Vermeidung des Verschnitts, Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit haben. Funktionselemente innerhalb einer 7-Lagen-MEA, insbesondere die CCM, sind allerdings im späteren Stackingprozess nicht detektierbar. Bei der Ausrichtung der MEA handelt es sich daher vorrangig um eine Schnittstellenoptimierung zwischen MEA-Fertigung und Brennstoffzellenstacking. Sofern nachgewiesen ist, dass sich Komponenten entsprechend präzise Ablegen lassen, kann davon ausgegangen werden, dass die Position der Bauteile bekannt ist.

Tabelle 3-1 fasst die jeweiligen Teilziele für die Subsysteme Greifer, Manipulator, Ausrichtung sowie das Gesamtsystem zusammen.

Tabelle 3-1 Gesamtsystem, Teilsysteme und Teilziele

(Teil-)system	Teilziel
Gesamtsystem	<ul style="list-style-type: none"> S1) Definition der Hardwareschnittstellen innerhalb des Gesamtsystems unter Berücksichtigung von Taktzeit und Toleranzkette S2) Definition der Softwareschnittstellen der Subsysteme S3) Einfluss der Umgebungsbedingungen auf qualitätsrelevante Eigenschaften S4) Quantifizierung der Gesamtunsicherheit; angestrebte Positioniergenauigkeit <0,1 mm im Gesamtsystem
Greifer	<ul style="list-style-type: none"> G1) Konstruktion und Aufbau eines Greifers für BPP, MEA und deren Komponenten G2) Konstruktion eines geeigneten Versuchsstandes zur Ermittlung der Ablagegenauigkeiten G3) Quantifizierung wirkender Kräfte G4) Quantifizierung der Unsicherheitsfaktoren beim Greifen und Ablegen einer MEA sowie deren Komponenten G5) Quantifizierung der Unsicherheitsfaktoren beim Greifen und Ablegen einer BPP
Ausrichtung	<ul style="list-style-type: none"> A1) Entwicklung eines Systems zur Ausrichtung der BPP anhand des funktionsrelevanten Merkmals Flowfield A2) Qualifizierung möglicher Auswertemethoden A3) Quantifizierung der Unsicherheitsfaktoren
Manipulator	<ul style="list-style-type: none"> M1) Auswahl eines Manipulators M2) Quantifizierung der Unsicherheitsfaktoren

3.2 Vorgehensweise

Der Gesamtprozess zur Entwicklung des Systems ist in Abbildung 3-2 dargestellt. Es sind die jeweiligen Kapitel hinterlegt, in denen die Betrachtung stattfindet. Weiterhin sind diese den einzelnen Teilzielen S1-S4, G1-G5, A1-A3 sowie M1,M2 aus vorherigem Abschnitt zugeordnet.

Zunächst sollen in der Planungsphase die Anforderungen definiert werden, woraus sich Prämissen für die weiteren Teilziele ergeben. Darauf aufbauend werden für die notwendigen Teifunktionen entsprechende Lösungsprinzipien erarbeitet (vgl. Abbildung 2-9), die hinsichtlich der Taktzeit und Toleranzkette bewertet werden (S1). Abschließend werden die Softwareschnittstellen zwischen den Teifunktionen festgelegt (S2). Neben dem eigentlichen Produktionssystem kann die Produktionsumgebung ebenfalls Einfluss auf qualitätsrelevante Merkmale haben, insbesondere die Luftfeuchtigkeit (S3).

Nach Definition erforderlicher Schnittstellen werden die Teilsysteme des Greifers sowie zur Positionsbestimmung betrachtet. Anhand des ausgewählten Funktionsprinzips wird ein Greifer konstruiert und aufgebaut (G1). Anhand eines Versuchsaufbaus mit reduzierten Freiheitsgraden werden relevante Genauigkeiten im Greifprozess ermittelt (G2). Ferner sollen die wirkenden Kräfte für spätere Schlussfolgerungen ermittelt werden (G3). Durch geeignete Versuchsreihen werden Ablagegenauigkeiten der MEA (G4) sowie der Bipolarplatte (G5) ermittelt.

Zur Positionsbestimmung wird ebenfalls zunächst ein Prototyp entworfen (A1). Anhand des Prototyps werden mögliche Auswertealgorithmen qualifiziert und bewertet (A2). Die Qualifizierung geschieht dabei statisch, das bedeutet, dass sich Greifer und Bauteil während der Versuche nicht in Bewegung befinden und lediglich deren Lage zueinander variiert wird. Mögliche Unsicherheitsfaktoren werden ermittelt, um die Auswertung weiter zu verfeinern (A3).

Zuletzt werden die beiden Teilsysteme gemeinsam mit dem Handhabungssystem kombiniert, es erfolgt eine Validierung des Gesamtsystems (S4). Die wesentlichen und quantifizierten Erkenntnisse werden abschließend zusammengefasst.

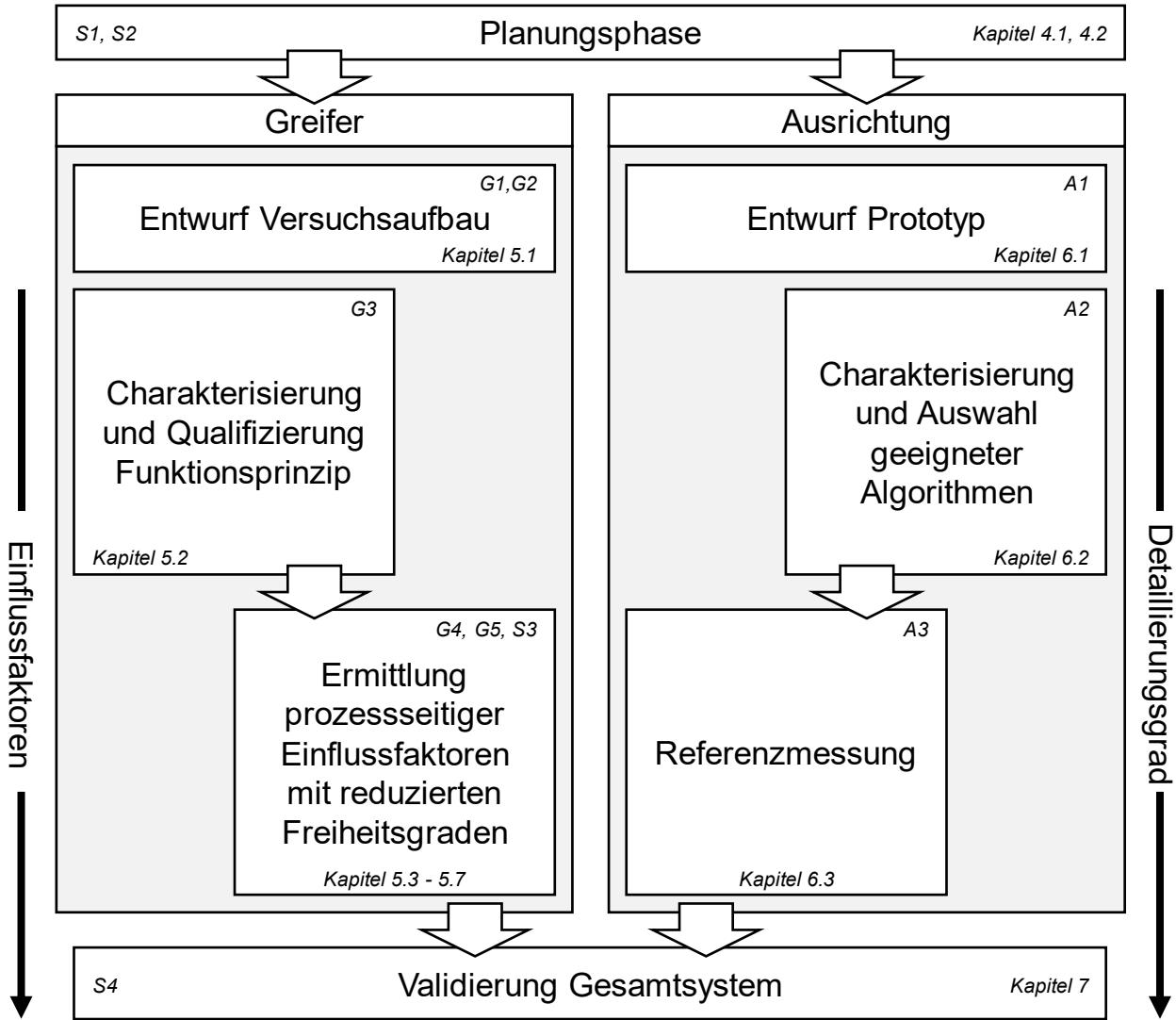


Abbildung 3-2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

4 Planungsphase

Die Planungsphase dient dazu, die Anforderungen an das System zu beschreiben und notwendige Maßnahmen abzuleiten. Die Anforderungen dienen dazu, den Teilzielen aus Kapitel 3 konkrete Maßnahmen zuzuordnen. In der Literatur finden sich hierzu verschiedene Methoden. Die folgende Vorgehensweise geschieht in Anlehnung an VDI 2222, Blatt 2 mit den wesentlichen Schritten Planen, Konzipieren, Entwerfen und Entscheiden (VDI 1982). Eine detaillierte Darstellung der Planungsphase aus Abbildung 3-2 ist Abbildung 4-1 zu entnehmen. Die Planungsphase umfasst dabei Kapitel 4.1 sowie Kapitel 4.2, die Konzeptionsphase erfolgt in Kapitel 4.3 respektive deren Unterkapitel für die einzelnen Teilfunktionen. Für die getroffene Auswahl werden abschließend die Schnittstellen der Teilsysteme definiert.

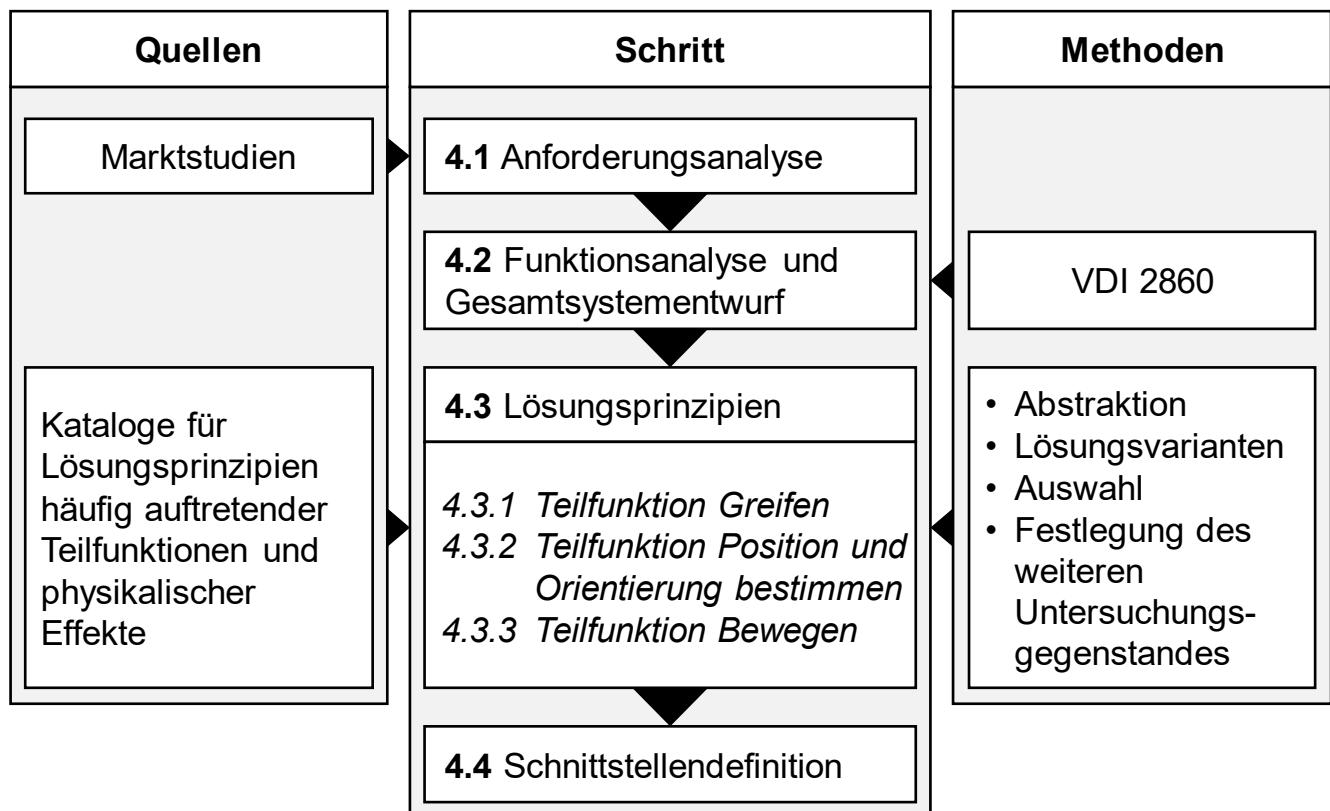


Abbildung 4-1 Aufbau des Kapitels 4

Zur Erstellung eines Katalogs für mögliche Lösungsprinzipien ist zunächst eine weitere Abstraktion der Fragestellung erforderlich. So kann beispielsweise die Aufgabe anstelle „Greifen einer CCM“ in „Greifen einer dünnen biegeschlaffen Folie“ überführt werden. Aus den identifizierten Lösungsprinzipien können diese auf deren Eignung für brennstoffzellenspezifische Komponenten hin geprüft werden. Soweit basierend auf vorliegenden Informationen möglich, wird anschließend eine Auswahl zur weiteren

Detaillierung getroffen. Falls die Auswahl anhand der in der Literatur vorliegenden Informationen nicht möglich ist, soll der weitere Untersuchungsgegenstand festgelegt werden.

4.1 Anforderungsanalyse

Die Marktdurchdringung der Brennstoffzelle ist eng geknüpft an den Aufbau der Infrastruktur. Die Infrastruktur betrifft dabei die gesamte Wertschöpfungskette von der Wasserstofferzeugung über den Wasserstofftransport bis hin zur Betankung oder Übergabe an das Fahrzeug. Aus dieser Mengenlage lassen sich einige Implikationen auf den Brennstoffzellenmarkt und damit auch die notwendigen Produktionsanlagen ableiten.

Eine Hürde zur Markteinführung der wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen im Mobilitätssektor liegt darin, dass diese an den Aufbau der notwendigen Betankungsinfrastruktur gekoppelt ist. Der Aufbau notwendiger Infrastruktur erfordert dabei längere Planungszeiten und einen erhöhten Investitionsbedarf. Dies wird dadurch deutlich, dass sich die Brennstoffzelle vorrangig in Märkten etablieren konnte, die ausschließlich eine lokale Infrastruktur benötigen. Dazu zählt unter anderem der öffentliche Personennahverkehr durch Busse mit Betankung im Depot (Tillmetz 2021, S. 52). Weitere bereits erschlossene Anwendungsgebiete sind die Intralogistik oder netzunabhängige Stromversorgung, beide ebenfalls mit einer dedizierten lokalen Betankungsinfrastruktur. Es ist davon auszugehen, dass sich **Produktionszahlen daher nur schrittweise erhöhen**. Auf den Maschinen- und Anlagenbau bezogen bedeutet dies, dass entwickelte Lösungen bereits bei geringen Stückzahlen wirtschaftlich eingesetzt werden müssen, gleichzeitig aber auch mit dem Markt mitwachsen müssen.

Die Einordnung des Stackings in die Gesamtprozesskette zeigt, dass das Stacking nicht den Bottleneck darstellt. Das Verschweißen metallischer Bipolarplatten, die Leckageprüfung, der Dichtungsauftrag sowie insbesondere das Konditionieren weisen höhere Taktzeiten auf (Schäfer & Fleischer 2021).

Aufgrund des geringen Marktvolumens ist es aus Sicht des Maschinen- und Anlagenbaus anzustreben, eine möglichst **universelle und adaptierbare Lösung** zu entwickeln. Dies bedingt, dass grundlegende Funktionselemente **keine herstellerspezifischen Merkmale** umfassen oder eine Konfigurierbarkeit zulassen.

Weiterhin sollen weitestgehend **Standardkomponenten** verwendet werden, um die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten.

4.2 Funktionsanalyse und Gesamtsystementwurf

Durch den seriellen und lagenweisen Aufbau eines Brennstoffzellenstack ist die Produktion gekennzeichnet durch zahlreiche wiederkehrende Prozessschritte. Die notwendigen Teilfunktionen der wiederkehrenden Funktionen in der Stapelbildung sind in Abbildung 4-2 in Anlehnung an VDI 2860 dargestellt. Zunächst muss das Bauteil (Bipolarplatte oder MEA) aus dem Magazin entnommen werden, wobei bei der Bipolarplatte nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Bereitstellungsgenauigkeit ausreichend hoch ist. Nach dem Abteilen eines einzelnen Bauteils (Vereinzelung) muss daher dessen Orientierung gemessen und korrigiert werden, ebenso dessen Positionierung. Es folgt die Weitergabe und letztlich das Lösen zur Ablage auf dem Stapel. Eine abschließende Sicherung der Bauteile erfolgt mit dem Verspannen, welches außerhalb der betrachteten Systemgrenze liegt.

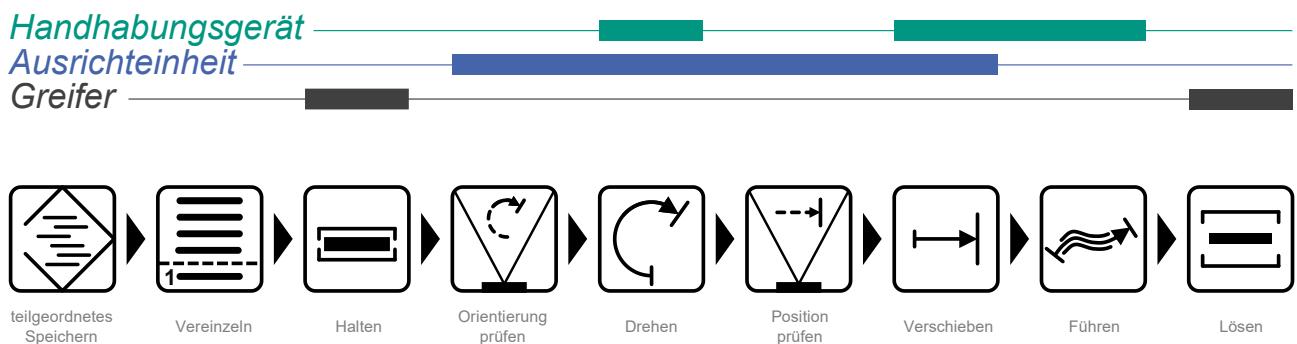


Abbildung 4-2 Brennstoffzellenstacking in Anlehnung an VDI 2860

Entsprechende Teilfunktionen wurden hinsichtlich des Stands der Technik bereits in Kapitel 2.6 beschrieben und in Abbildung 2-9 dargestellt. Weiterhin sind in Kapitel 2.6 die wesentlichen Einschränkungen genannt, die sich bei der Ausrichtung ergeben. Die Teilfunktionen werden dabei nachfolgenden Funktionsträgern zugeordnet:

- Greifer: verantwortlich für das Greifen und Ablegen der Bauteile
- Ausrichteinheit: sorgt für die Bestimmung der Position und Orientierung einzelner Bauteile
- Handhabungsgerät: führt Positionskorrekturen (Orientieren, Positionieren) aus und führt das Bauteil zu seiner Ablageposition.

Die Anforderungen an die einzelnen Funktionsträger, die für eine Funktionserfüllung abzusichern sind, sollen nachfolgend zusammengefasst werden.

Greifer: Der Greifer soll zu einer beschädigungsfreien Handhabung der Bauteile in der Lage sein. Die Bauteilposition soll sich während der Handhabung nicht verändern. Es soll dabei auf aus dem Stand der Technik verfügbare Lösungen zurückgegriffen werden, wobei folgende Punkte zu überprüfen sind:

- Welche Haltekräfte werden erzielt und sind diese ausreichend, um eine prozesssichere Handhabung auch in dynamischen Prozessen zu ermöglichen?
- Welche Wechselwirkung besteht zwischen dem Greifer und der erzielbaren Genauigkeit und was sind die wesentlichen Parameter, die damit eine Wechselwirkung zeigen?

Ausrichteinheit: Wie in der Fehlerbetrachtung in Abschnitt 2.6.2 dargestellt, beeinflusst die Ausrichtung des Flowfields die Funktion und Langlebigkeit eines Brennstoffzellenstacks. Als Merkmal aus dem Umformprozess wird diese mit hoher Genauigkeit gefertigt. Daher ist es vorteilhaft, wenn die Orientierung einer Bipolarplatte anhand des funktionsrelevanten Merkmals des Flowfields geschieht. Das Flowfield ist dabei zwischen verschiedenen Herstellern universell, da es zur Funktionserfüllung der Brennstoffzelle notwendig ist. Dieses Teilsystem zur Bestimmung von Position und Orientierung muss im Wesentlichen dazu in der Lage sein, die Position in der erforderlichen Genauigkeit zu erfassen. Zur Qualifizierung müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Welcher Sensor eignet sich für die Verwendung, insbesondere wenn ein breites Portfolio abgedeckt werden soll?
- Mit welchen Verfahren kann das Sensorsignal in der notwendigen Güte ausgewertet werden?
- Welche Genauigkeit lässt sich mit dem System erreichen?

Das **Handhabungsgerät** selbst, die Optimierung und Beschleunigung der Bewegungsabläufe sind nicht Bestandteil der Untersuchungen. Die durch das System erzielbaren Genauigkeiten hängen aber letztlich von der Summe aller Einzelgenauigkeiten ab. Zur statistischen Auswertung soll daher die Genauigkeit des im weiteren Verlauf zu bestimmenden Handhabungsgerätes untersucht werden.

Gesamtsystementwurf

In dem Funktionsplan (Abbildung 4-2) sind zunächst nur die notwendigen Schritte in lösungsneutraler Form dargestellt, aus der sich mehrere Systementwürfe ableiten lassen. Varianten ergeben sich durch Änderungen der sequenziellen Abfolge oder durch Funktionsintegration. Im Folgenden werden mögliche Systementwürfe anhand der sich ergebenden Toleranzkette sowie geschätzter Prozesszeiten bewertet.

Variante A: Eine mögliche Lösung stellt eine Ausrichtung der Bipolarplatte vor dem Greifen dar. Vergleichbare Lösungen sind in der Batteriezellfertigung anzutreffen (siehe Abbildung 2-10). Dabei wird das Bauteil auf einer dedizierten Ausrichteinheit platziert und Position und Orientierung werden bestimmt. Es folgt eine Ausrichtung des Bauteils, beispielsweise mittels eines Kreuztischs. Das positionierte und orientierte Bauteil wird dann gegriffen und abgelegt. Es wird angenommen, dass die Positionsvermessung in der Nebenzeite erfolgt. Eine schematische Darstellung sowie der Verlauf der Geschwindigkeit v des Greifers über die Zeit t sind in Abbildung 4-3 dargestellt.

Toleranzkette A: 1 Kameragenauigkeit - 2 Positioniergenauigkeit Kreuztisch - 3 Greifgenauigkeit Aufnahme - 4 Wiederholgenauigkeit Handhabungsgerät Aufnahme - 5 Wiederholgenauigkeit Handhabungsgerät Ablage - 6 Greifgenauigkeit Ablage

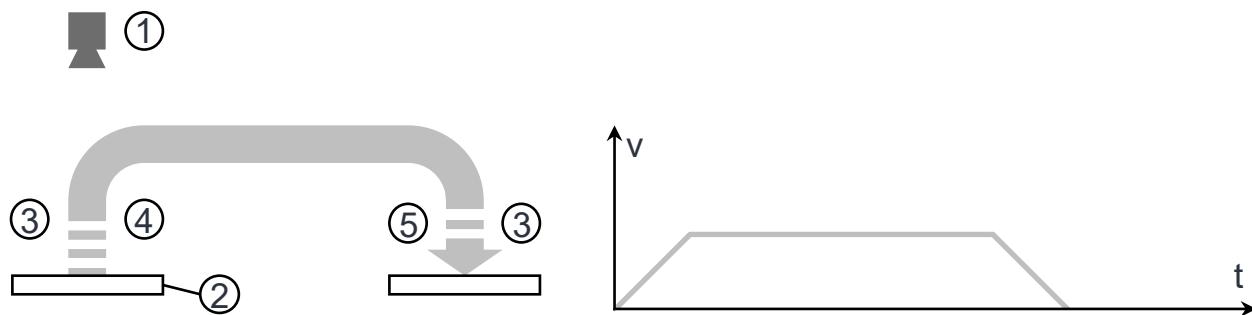


Abbildung 4-3 Toleranzketten und Prozesszeitbetrachtung Variante A

Variante B: Eine weitere Lösung kann vorsehen, dass das Bauteil durch ein Handhabungsgerät aus dem Magazin oder einer Bereitstellungseinheit gegriffen wird. Das Bauteil wird im Anschluss zu einer ortsfesten Vermessungsstation geführt. Die Vermessungsstation bestimmt Positionierung und Orientierung und übermittelt diese dann in Form von Korrekturwerten an das Handhabungsgerät. Während der Positionsvermessung erfolgt keine Bewegung des Handhabungsgeräts. Sofern am Handhabungsgerät eine Referenzmarkierung vorhanden ist, kann die Ungenauigkeit des

Handhabungsgeräts ausgeglichen werden. Sowohl die Bestimmung einer Referenz als auch die Positionsbestimmung des Bauteils erfolgen jeweils mit der Kamera-Genauigkeit.

Toleranzkette B: 1 Kameragenauigkeit (2x, Erfassung des Greifers und des Bauteils) - 2 Wiederholgenauigkeit Handhabungsgerät Ablage - 3 Greifgenauigkeit Ablage

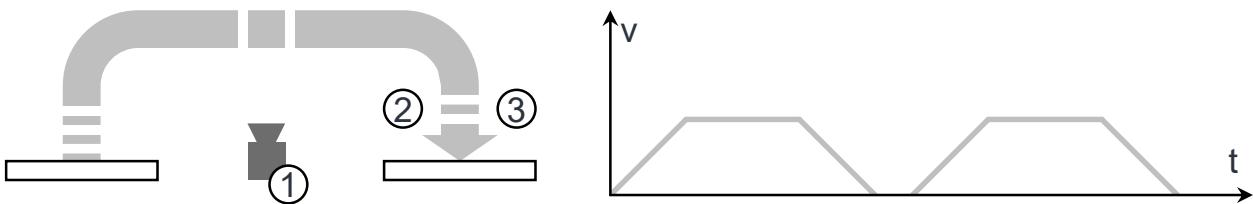


Abbildung 4-4 Toleranzketten und Prozesszeitbetrachtung Variante B

Variante C: In einer dritten Lösungsvariante kann das Bauteil aus dem Magazin entnommen werden, vergleichbar mit vorheriger Lösungsvariante. Im Unterschied zu dieser erfolgt die Vermessung allerdings nicht ortsfest, sondern in Hand-Eye-Konfiguration durch das Handhabungsgerät.

Toleranzkette C: 1 Kameragenauigkeit - 2 Wiederholgenauigkeit Handhabungsgerät Ablage - 3 Greifgenauigkeit Ablage

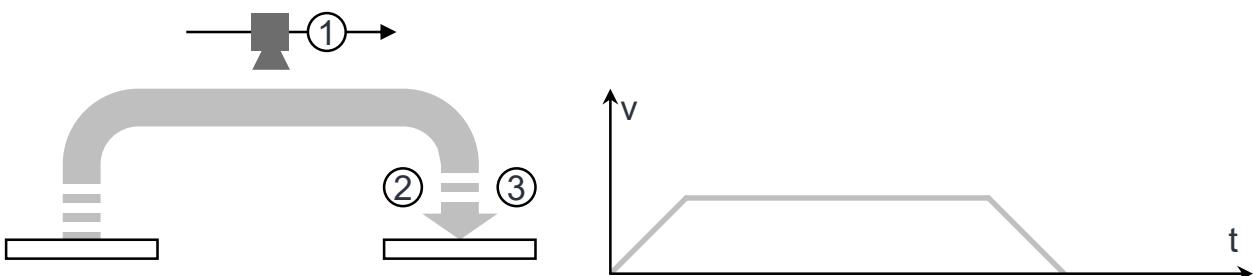


Abbildung 4-5 Toleranzketten und Prozesszeitbetrachtung Variante C

Variante A sowie Variante C zeigen ceteris paribus die gleichen Prozesszeiten, Variante B weist eine höhere Prozesszeit auf. Unter Betrachtung der sich ergebenden Toleranzketten zeigen Variante B und Variante C gleiche Toleranzketten, Variante A hingegen weist ceteris paribus eine längere Toleranzkette auf.

Die tatsächlichen Beiträge zu Prozessgenauigkeiten sind von der verwendeten Anlagentechnik abhängig und können daher direkt den einzelnen Teilsystemen sowie deren Teilelementen zugeordnet werden. Eine Ausnahme bildet das Greifen sowie das Ablegen des Bauteils. Wie im Stand der Technik angrenzender Produktionsfelder (Kapitel 2.6.4) dargestellt, kann diese bauteilabhängig sein. Aufgrund des doppelten Beitrags zu der Gesamttoleranz in Variante A im Vergleich zu Variante C kann dort von einer höheren Unsicherheit bei wechselnden Produkten und damit von einer geringeren Universalität ausgegangen werden.

Der Gesamtsystementwurf kann dabei allerdings auch Einfluss auf die Ausgestaltung der Einzelemente und deren Auswirkung auf die zentralen Kriterien Toleranzkette und Prozesszeit haben. So kann beispielsweise angenommen werden, dass eine externe Kamera aufgrund des großen zur Verfügung stehenden Bauraums eine höhere Genauigkeit liefern wird als eine integrierte Kamera. Weiterhin kann die Geschwindigkeit des Handhabungsgeräts bei integrierter Kamera geringer sein, da das zusätzliche Gewicht die Dynamik einschränkt oder gegebenenfalls gar ein Handhabungssystem mit höherer Traglast und damit verringriger Genauigkeit verwendet werden muss. In (Brützel et al. 2021) konnte beispielsweise durch Anwendung der Variante C ein um 11 % höherer Durchsatz im Vergleich zu Variante B erreicht werden.

Aufgrund der beiden zentralen Vorteile – geringe Toleranzkette bei geringer Prozesszeit – wird im Folgenden Variante C weiterverfolgt. Aufgrund der diskutierten Wechselwirkungen werden an das Zielsystem zur Bestimmung der Position und Orientierung jedoch die Anforderungen gestellt, dass dieses möglichst kompakt und leicht gestaltet sein soll.

4.3 Lösungsprinzipien

Wie in Abbildung 4-1 dargestellt, wird die Funktionsbeschreibung zur Auswahl der Lösungsprinzipien zunächst abstrahiert. Aus zu erstellenden oder bestehenden Katalogen für Lösungsprinzipien zur Erfüllung der Teifunktionen soll anhand eines Abgleichs mit dem Stand der Technik und den speziellen Anforderungen der Brennstoffzelle eine Vorauswahl getroffen werden. Zur endgültigen Festlegung werden in diesem Unterkapitel abschließend Versuchsumfänge definiert.

4.3.1 Teifunktion Greifen

Die Aufgabe des Teilsystems Greifen ist dadurch charakterisiert, dass die Bauteile MEA und Bipolarplatte beschädigungsfrei und mit hoher Präzision aufgenommen und abgelegt werden müssen. Eine Charakterisierung in Bezug auf Flächengewichte, Porosität und weiteren Randbedingungen wurde in Kapitel 2.6.1 bereits im Stand der Technik dargestellt.

VDI 2740 formuliert einen Katalog für die möglichen Greifprinzipien nach deren Wirkmechanismus: Greifen durch Magnetismus, durch Oberflächenverhakungen, durch Ansaugen, durch direktes pneumatisches oder hydraulisches Spannen sowie durch mechanisches Greifen (VDI 1995). Detailliertere Kataloge und Klassifikationen sind weiterhin in (Reiff-Stephan 2013), (Schneider 1999) sowie (Seliger et al. 2003) aufgeführt, lassen sich jedoch stets auf die grundlegenden Wirkprinzipien zurückführen. Durch Diskussion exkludierender Eigenschaften der Materialien sollen diese Wirkprinzipien weiter reduziert und eine Vorauswahl getroffen werden.

Aufgrund der Materialeigenschaften (vgl. Abschnitt 2.6.1) ist Greifen durch Magnetismus nicht möglich. Das Greifen flächiger Bauteile ist ferner nicht durch direktes pneumatisches oder hydraulisches Spannen möglich. Ein mechanisches Greifen ist prinzipiell für biegesteife Bauteile geeignet, bringt jedoch auch die Gefahr einer Beschädigung dünner Bauteile mit sich. Hervorzuheben ist hier insbesondere eine Deformation der dünnen Bauteilkante metallischer Bipolarplatten. Somit verbleibt ausschließlich das Greifen durch Ansaugen. Mögliche Umsetzungsformen vorrangig flächiger Unterdruckgreifer sind in (Götz 1991) umfänglich beschrieben. Nach (Götz 1991, S. 107) ist insbesondere bei flächigen Bauteilen eine möglichst flächige Krafteinbringung anzustreben. Zum einen wird dadurch ein Segeleffekt vermieden, zum anderen ist gewährleistet, dass das Bauteil seine Position behält. Aus diesem Grund eignen sich einzelne Vakuumgreifer nicht für flächige, biegeschlaffe Materialien wie die CCM und nur bedingt für die GDL. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die GDL funktionsbedingt luftdurchlässig ist, daneben können zu starke Kräfte zu einem ungewünschten Herauslösen der Faser führen (siehe Kapitel 2.6.1). Für die äußerst dünne CCM muss weiterhin sichergestellt werden, dass diese durch den Unterdruckeffekt keine Beschädigungen aufweist.

Anhand bestehender Kataloge der Greifprinzipien konnten somit die Lösungsvarianten deutlich eingegrenzt werden. Dies deckt sich ebenfalls mit dem ermittelten Stand der

Technik (siehe Tabelle 2-3). Aus den genannten Implikationen sind in der Brennstoffzellenfertigung vorrangig Vakuumgreifer sowie Niederdruckflächengreifer anzutreffen. Dieses Funktionsprinzip soll daher aufgrund seiner Eignung im weiteren Verlauf übernommen werden. Folgende wesentliche Schritte sollen zur Qualifizierung des Teilsystems Greifen durchgeführt werden:

- Welches Kraftfeld übt der Greifer auf das Bauteil aus?
- Welche Unsicherheitsbeiträge ergeben sich durch das Greifen hinsichtlich erzielbarer Genauigkeiten und wie beeinflussen Abstände bei der Bauteilaufnahme sowie Bauteilablage die Genauigkeiten?
- Ergeben sich bei der CCM oder MEA weitere Unsicherheitsbeträge durch die Umgebungsbedingungen, insbesondere die Luftfeuchte?

4.3.2 Teilfunktion Position und Orientierung bestimmen

Im Stand der Technik wurde identifiziert, dass insbesondere der Bipolarplatte eine hohe Bedeutung bei der Ausrichtung und Orientierung zukommt. Weiterhin wurde dargestellt, dass ausschließlich optische Systeme dazu geeignet sind. Aus diesem Grund soll in der folgenden Betrachtung vor allem auf die optische Bestimmung der Position einer Bipolarplatte der Fokus gelegt werden. Relevante Genauigkeiten der MEA werden vor allem während deren Herstellung beeinflusst und können daher während des eigentlichen Stackings nicht beeinflusst werden. Zur Ausrichtung der Bipolarplatten muss zunächst die Position bestimmt werden. Dies erfordert lokale Unterschiede in messbaren physikalischen Größen in den funktionsrelevanten Merkmalen. Temperatur, Leitfähigkeit sowie Kapazität sind über das Bauteil hinweg makroskopisch homogen und eignen sich folglich nicht zur Ausrichtung. Optische Sensoren eignen sich hingegen gut, um Oberflächenstrukturen durch hell-dunkel Kontraste erkennen zu können.

Da die zu bestimmenden Funktionsmerkmale zwischen den Herstellern unterschiedlich positioniert sein können, ist es vorteilhaft, wenn ein möglichst großer Bereich abdeckbar ist. Die Positionserfassung zum Orientieren und Positionieren der Bauteile soll on-the-fly erfolgen, wie in Kapitel 4.2 motiviert. Durch die Integration im Greifer ist der Bauraum deutlich eingeschränkt. Weiterhin reduziert zusätzliches Gewicht die Dynamik. Zur Auswahl des Funktionsprinzips soll die Fragestellung abstrahiert werden, um in Anschluss daran mittels einer Analogietechnik in angrenzenden Feldern des Stands der Technik Lösungen zu identifizieren. Im Folgenden soll ein Katalog derjenigen

Lösungsprinzipien aufgestellt werden, die die Lösung zu dieser Aufgabe beschreibt: Wie lässt sich die relative Verschiebung eines Objektes durch optische Sensoren bestimmen?

Kantendetektion: Die Kantendetektion beruht maßgeblich auf einem hell-dunkel Kontrast zwischen angrenzenden Pixeln. Hell-dunkel Kontraste können beispielsweise im Flowfield durch geeignete Beleuchtung erzeugt werden. Durch geeignete Filter wird dieser hell-dunkel Kontrast durch eine Faltung erfasst. Für dieses Vorgehen stehen robuste Algorithmen, beispielsweise der Canny-Algorithmus, zur Verfügung. Zwar lassen sich durch derartige Algorithmen Strukturen im Bild gut erkennen, um letztlich aber eine Verschiebung zu bestimmen, ist eine weitere Bildverarbeitung notwendig. Die Bildverarbeitung und -auswertung erfolgt in der Regel individuell nach Anwendungsfall. Es existieren darüber hinaus auch Methoden zur Detektion im Subpixelbereich. Da durch eine Kantendetektion jedoch nicht direkt die geforderte Universalität erreicht wird, wird dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

Merkmalsmethoden: Innerhalb eines Bildes wird ein Merkmal lokalisiert und mit weiteren beschreibenden Attributen versehen. In dem zweiten Bild werden ebenfalls Merkmale lokalisiert und mit Attributen versehen. Zwischen den Merkmalen gleicher Attribute kann ein Verschiebungsvektor aufgespannt werden. Durch die Betrachtung zahlreicher Verschiebungsvektoren kann durch geeignete Optimierungsalgorithmen eine Abbildungsmatrix bestimmt werden. Ein häufiger Vertreter dieser Kategorie ist die skaleninvariante Merkmalsextraktion (*engl. Scale-Invariant Feature Transform, SIFT*). Der besondere Vorteil des Algorithmus liegt in der Robustheit gegenüber Skalierungen und Belichtungsänderungen. SURF (*Speeded up Robust Features*) bildet eine Abwandlung gegenüber SIFT mit besserer Robustheit. Neben der Objekterkennung findet dieses Verfahren häufig Anwendung im sogenannten Image-Stitching, also der Erstellung eines großformatigen Bildes aus einzelnen, sich überlappenden kleinformatigen Bildern.

Korrelationsmethoden: Die Auswertung geschieht anhand der Phaseninformation der Fourier-Transformation zweier Bilder. Darauf aufbauend kann ein ortsabhängiger Kreuzkorrelationskoeffizient bestimmt werden. Dieser Kreuzkorrelationskoeffizient drückt die Ähnlichkeit zwischen den beiden Bildern aus, der Ort der höchsten Ähnlichkeit entspricht der Verschiebung beider Bilder zueinander. Das Verfahren wird als Phase Cross Correlation bezeichnet. Ein weiterer Vertreter ist beispielsweise das Template-Matching, bei dem ein Bildausschnitt mit einem größeren Bild verglichen wird.

Bereiche hoher Ähnlichkeit und damit die Position des Bildausschnittes innerhalb des Gesamtbildes können dadurch ermittelt werden. Mittels der Auswertung der Phaseninformationen konnten beispielsweise in (Klee 2022, S. 46) Genauigkeiten im Subpixel-Bereich erreicht werden.

Anhand der Beschreibung und vorliegenden Literatur kann zunächst keine Aussage über die Eignung der Merkmalsmethoden oder Korrelationsmethoden getroffen werden, weshalb dies Gegenstand der weiteren Untersuchungen ist.

4.3.3 Teilfunktion Bewegen

Systeme zur Erfüllung der Aufgabe lassen sich im Wesentlichen durch erreichbare Genauigkeiten, Beschleunigungen und Geschwindigkeiten charakterisieren. Aus diesen technologischen Parametern ergibt sich letztlich die Produktivität. Eine vergleichende Darstellung verschiedener Varianten erfolgt in Abbildung 4-6. In der Robotik beschreibt der Begriff Pose nach ISO 8373 die Orientierung und Position des Werkzeuges im Raum (ISO 2021). Steuert die Kinematik dieselbe Pose mehrmals an, so wird deren Abweichung untereinander als Pose-Wiederholgenauigkeit definiert. Diese Wiederholgenauigkeit stellt ein zentrales Kriterium für den hier untersuchten Anwendungsfall dar, daneben ist die sich ergebende Zykluszeit entscheidend. In Abbildung 4-6 sind diese Parameter für verschiedene Systeme aus dem Stand der Technik dargestellt. Sofern eine Zykluszeit im Datenblatt angegeben ist, wurden nur solche Angaben berücksichtigt, die bei Angabe eines Abstandes zwischen 300 mm und 305 mm erfolgen. Für Lineardirektachsen wurde die Zykluszeit aus maximal möglicher Beschleunigung und Geschwindigkeit errechnet. Das Gewicht des Handhabungsgeräts wurde nicht berücksichtigt. Die Datengrundlage von Abbildung 4-6 kann dem Anhang entnommen werden.

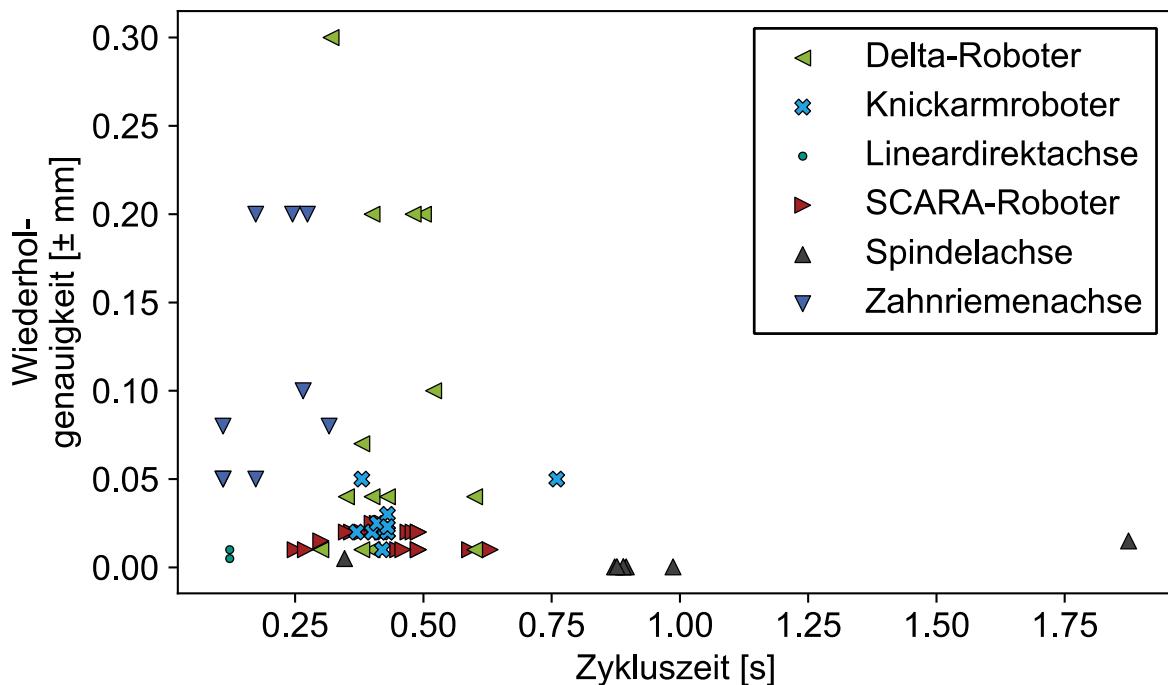


Abbildung 4-6 Wiederholgenauigkeit und Zykluszeit versch. Manipulatoren

Lineardirektachsen eignen sich ohne Einschränkungen und weisen die geringste Zykluszeit auf, gefolgt von SCARA-Robotern sowie Delta- und Knickarmrobotern. Einschränkend sind bei Delta-Robotern die teilweise deutlich hohen Wiederholgenauigkeiten. Portalsysteme mit Zahnriemenachsen sind aufgrund unzureichender Wiederholgenauigkeiten nicht für den Einsatz in der Brennstoffzellenstackfertigung geeignet.

Die Erfüllung der Teilfunktion „Bewegen“ beschränkt sich somit auf die Auswahl und gegebenenfalls die Qualifizierung zu erwerbender Maschinen. Es schließt sich daran keine wissenschaftliche Fragestellung an.

4.4 Schnittstellendefinition

In Abbildung 4-7 sind die geplanten und zu entwickelnden Teilmodule und deren Schnittstellen dargestellt. Im Handhabungssystem ist das allgemeine Ablaufprogramm hinterlegt. Dieses Ablaufprogramm beinhaltet die Nennposition während des Greifens ($P_{Aufnahme}$) und während des Ablegens (P_{Ablage}). Über eine I/O Schnittstelle soll der Greifer mit dem Handhabungssystem verbunden werden, um die Signale Greifen-Start sowie Greifen-Ende übertragen zu können. Im Ablaufprogramm ist ferner ein Trigger-Zeitpunkt (t_{Mess}) hinterlegt. Dieser veranlasst die Erfassung des Bauteils sowie die daran anschließende Positionsbestimmung. Über die Auswerteeinheit wird der

entsprechende Korrekturwert P_{Korr} dem Handhabungssystem übermittelt. In dem Ablaufprogramm wird P_{Ablage} mit P_{Korr} verrechnet.

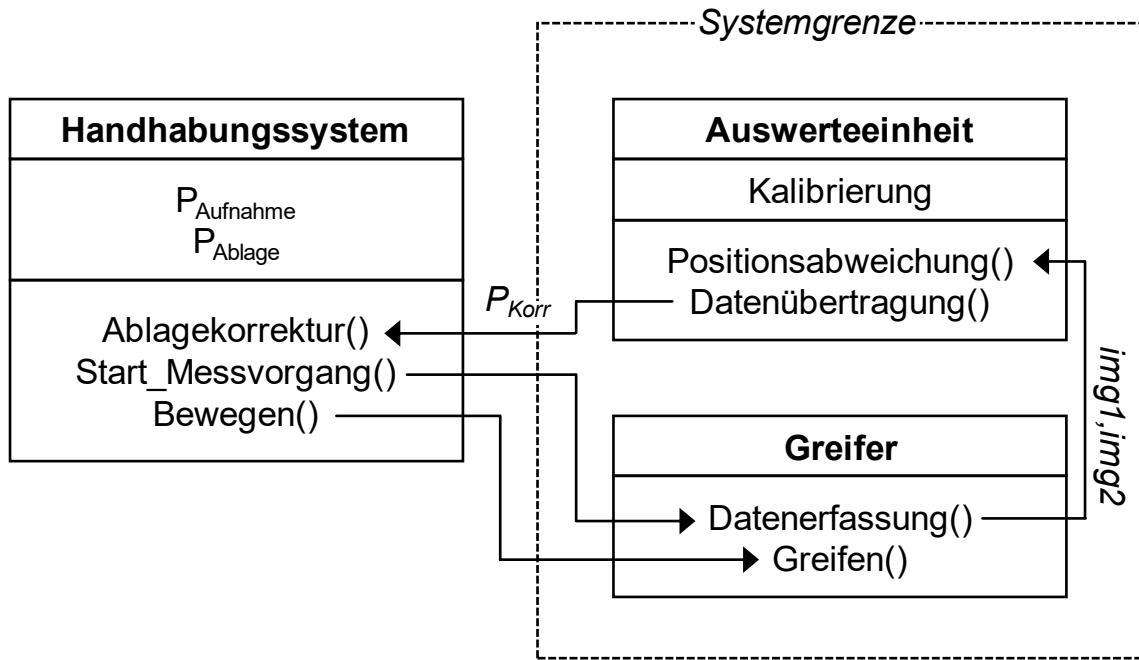


Abbildung 4-7 geplante Architektur und Teilmodule

Das Handhabungssystem selbst liegt dabei außerhalb der zu untersuchenden Systemgrenze. Aufgrund hoher Flexibilität im Technikumseinsatz wurde ein 6-Achs-Vertikalknickarmroboter (Kuka KR10 R900-2) ausgewählt. Zur Umsetzung produktiverer Stapelvorgänge kann dieser mit einem identischen Greifer durch Scara-Roboter oder Portale mit Lineardirektachsen ersetzt werden (vgl. Abbildung 4-6).

Der Greifer hingegen stellt den Kern der Arbeit dar und er soll entwickelt und qualifiziert werden. Er beinhaltet zwei Teilmodule: Das Teilmittel zur Bauteilerfassung sowie ein Teilmittel, das als Hardwareschnittstelle und zum eigentlichen Greifvorgang dient.

Die Bauteilerfassung soll mit einer Industriekamera erfolgen (vgl. Kapitel 4.3.2). Diese muss ausreichend kompakt und dazu in der Lage sein, bei geringer Beleuchtungsstärke sowie geringem Abstand ausreichend präzise Ergebnisse zu liefern. Weiterhin ist eine geeignete Beleuchtung zu integrieren. Für den Greifer wird ein kommerzieller Ejektor verwendet. Die entsprechende Greiffläche wird entworfen und qualifiziert.

Aufgrund des hinreichend großen Zeitfensters zwischen der Bauteilerfassung und der Bauteilablage inklusive der Korrektur ist die Auswertung nicht zeitkritisch. Die Auswertung geschieht durch einen Computer. Als Schnittstelle fungiert eine TCP-Verbindung (*Transmission Control Protocol*) zwischen der Robotersteuerung (KRC5)

sowie dem Computer. Das Programm Kappa⁵ erlaubt dabei per TCP Variablen an die Robotersteuerung zu senden. Durch einfache Matrixmultiplikation können Korrekturwerte somit den Ablagepunkten überlagert werden.

⁵ <https://www.dehof.de/de/software.html>, zuletzt abgerufen am 22.06.2023

5 Ermittlung prozesseitiger Einflussfaktoren

Ein zentrales Kriterium für die Handhabungstechnik in der Brennstoffzellenfertigung ist die erzielbare Genauigkeit des Stapelprozesses, wie in Kapitel 2.6.2 dargestellt. Zuvor wurden in Kapitel 4.2 sich ergebende Toleranzketten qualitativ beschrieben. Für eine zielgerichtete Optimierung hinsichtlich erreichbarer Genauigkeiten ist es jedoch erforderlich, diese ebenfalls zu quantifizieren. Dabei ergibt sich die wesentliche Herausforderung dadurch, dass sich einzelne Prozessstreuungen in einem Gesamtsystem überlagern.

Folglich ist in einem gesamten Montagesystem nur die Gesamtvarianz sichtbar, deren einzelne Beiträge können jedoch nicht isoliert observiert werden. Weiterhin tauchen Störgrößen auf, von denen die Aufnahme- sowie Ablagehöhe hauptbeeinflussend sind (Schäfer & Fleischer 2022). Nur durch Abbildung von Teilsystemen mit reduzierten Freiheitsgraden können die Einzelvarianzen ermittelt werden.

Dabei ist aus anderen Prozessen bekannt, dass die Prozessgenauigkeit bei Greif- und Stapelprozessen zum Teil deutlich geringer als die Maschinengenauigkeit ist (siehe Kapitel 2.6.4). Weiterhin erlaubt eine Quantifizierung der Einflussfaktoren die Aussage darüber, ob ein Produkt überhaupt dazu geeignet ist, in der notwendigen Präzision gestapelt zu werden. Dem kommt insbesondere eine große Bedeutung zu, da in einem Lastenheft häufig zu erreichende Zielwerte gefordert werden, sich diese aber nur in Teilen durch die verwendete Maschinentechnik beeinflussen lassen. Aus diesem Grund soll ein exemplarisches Vorgehen skizziert werden, das dazu in der Lage ist, die Prozessfähigkeit zu bewerten. Genauigkeiten mit einem gewählten Aufbau sollen quantifiziert werden. Zur Datenerhebung und Bewertung sollen nachfolgende Methoden verwendet werden:

- **Versuchspläne** spannen den Parameterraum auf und die entsprechenden Daten können erhoben werden.
- **Qualitätsregelkarten** sollen verwendet werden, um den zeitlichen Verlauf der Positionsgenauigkeiten graphisch aufzubereiten. Die Darstellung wird um **Zielscheibendiagramme** ergänzt, die eine gleichzeitige Bewertung in zwei Dimensionen ermöglicht.
- Die **Prozessfähigkeit** soll bestimmt werden.

- Angelehnt an die Methode nach Taguchi sollen die Parameter so ausgewählt werden, dass das System möglichst stabil und unempfindlich gegenüber Störgrößen ist
- Eine **Varianzanalyse** (engl. *Analysis of Variance, ANOVA*) wird durchgeführt, um die Signifikanz der Messergebnisse bewerten zu können. Weiterhin können dadurch dominante Faktoren bestimmt werden.

5.1 Versuchsaufbau

Mit Hilfe eines Versuchsaufbaus soll ermittelt werden, welchen Einfluss das Greifen des Bauteils sowie das Ablegen des Bauteils auf die Genauigkeit haben. Diese wurden zwar beispielsweise in (Götz 1991, S. 78) genannt, jedoch nicht quantifiziert. Insbesondere hat keine Quantifizierung von spezifischen Bauteilen in der Brennstoffzelle stattgefunden. Der hierfür konstruierte und im weiteren Verlauf verwendete Versuchsstand ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

Die beiden Teilschritte der Bauteilaufnahme und Bauteilablage lassen sich dabei für eine Toleranzbetrachtung nur bedingt voneinander isolieren. Die Effekte müssen daher durch geeignete Versuchspläne ermittelt werden. Mittels einer Linearachse mit Spindeltrieb kann der Greifer in z-Richtung verfahren werden. Eine Bewegung des Greifers in der Ebene ist durch eine Linearführung ausgeschlossen. Folglich sind messbare Abweichungen der Bauteilposition in der Ebene ausschließlich auf den Greif- und Ablagevorgang zurückzuführen. Der Greifer des Versuchsstandes (Abbildung 5-1 im Teilquerschnitt) wurde vor der Versuchsdurchführung parallel zu dem Ablagetisch ausgerichtet. Es wurde für sämtliche Versuche in Kapitel 5 derselbe Greifer verwendet.

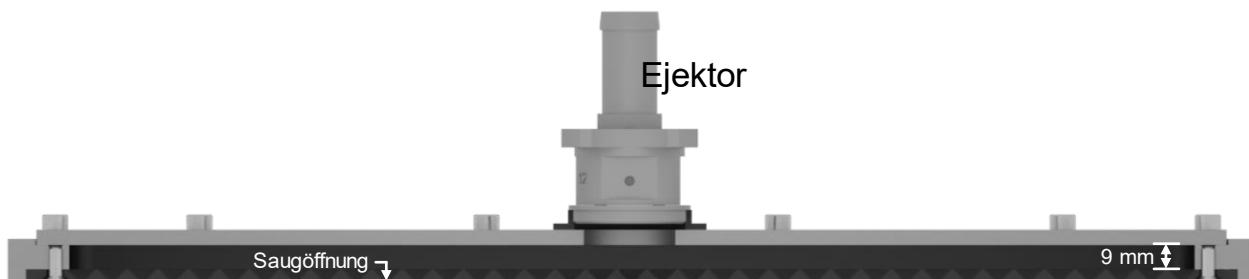


Abbildung 5-1 Greifer im Teilquerschnitt

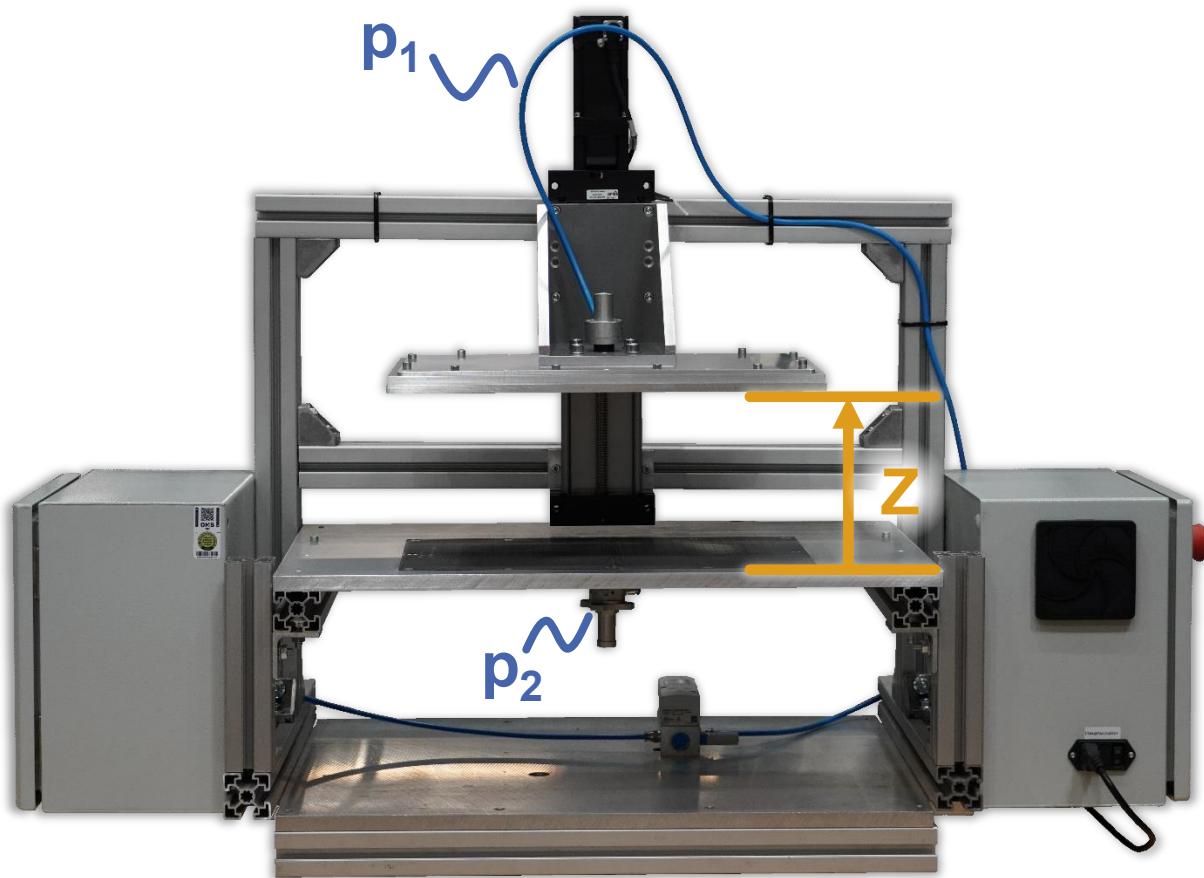


Abbildung 5-2 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Genauigkeiten

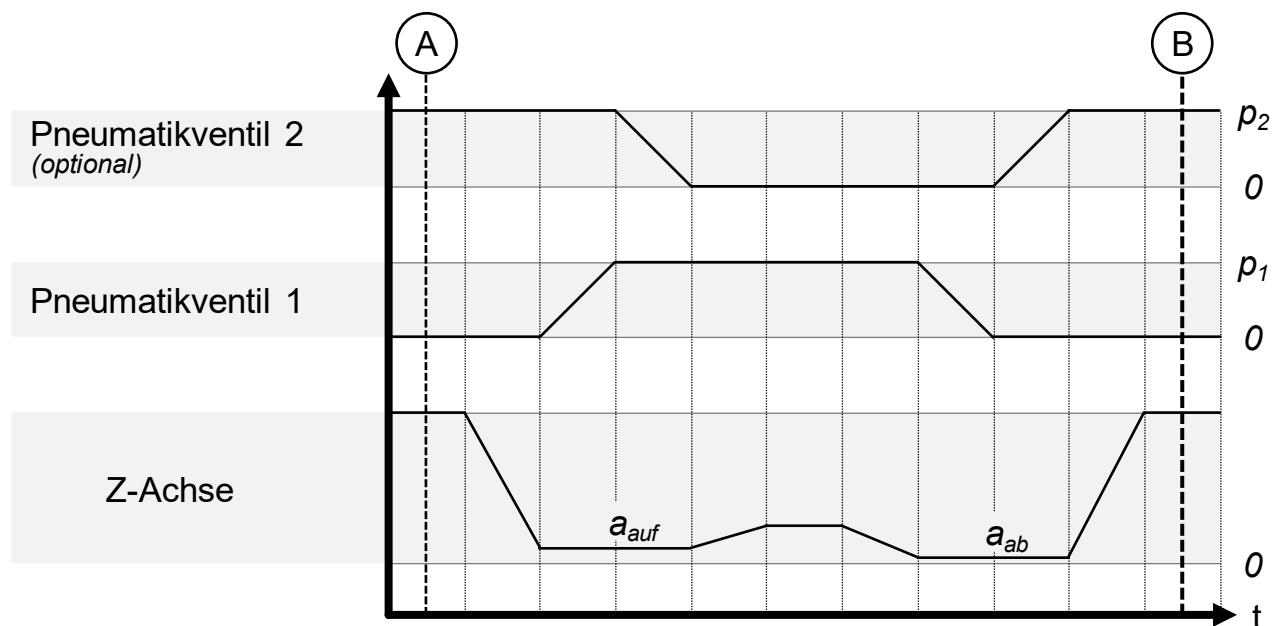


Abbildung 5-3 Funktionsdiagramm der Versuchsdurchführung

In Abbildung 5-3 ist ein Funktionsdiagramm dargestellt, das den zeitlichen Ablauf der Versuche beschreibt (vgl. Abbildung 5-2). Dabei wird die Aufnahmehöhe (a_{auf}) angefahren, im Anschluss wird der Ejektor mit Druck beaufschlagt (p_1). Nach einer Wartedauer von $t = 1$ s wird der Greifer auf eine Haltposition gefahren. Im Anschluss daran wird die Ablagehöhe (a_{ab}) angefahren, die Druckluftzufuhr p_1 wird getrennt. Nach einer Wartedauer von $t = 1$ s fährt der Greifer erneut die Nullposition an. Die Position des Bauteils wird zu den Zeitpunkten A und B erfasst (siehe Abbildung 5-3)

Wie in Kapitel 2.6.4 beschrieben finden sich in angrenzenden Feldern der Produktions-technik mit Unterdruck beaufschlagte Tische. In dem Versuchsaufbau kann dies durch ein zusätzliches Ventil (p_2) abgebildet werden (vgl. Abbildung 5-2). Das Pneumatikventil p_2 ist zu Beginn des Versuches aktiviert und wird bei Erreichen der Aufnahmehöhe deaktiviert. Sofern nicht abweichend vermerkt, wurden die Versuche ohne Unterdruck auf dem Tisch durchgeführt.

Die Bauteilposition wird durch ein 3D-Messsystem (GOM Atos Q) bestimmt. Es werden einzelne Positionsmarker auf dem Bauteil befestigt. Deren räumliche Position wird vor (A) und nach (B) dem Greif- und Ablagevorgang gemessen (Formel 5-1). Durch Anwendung des Kabsch-Algorithmus kann daraus eine Rotationsmatrix R und ein Translationsvektor T zwischen den Punktewolken bestimmt werden. Dazu werden beide Punktewolken auf deren Mittelpunkt $[X_m, Y_m, 0]$ zentriert (Formel 5-2).

Im Nachfolgenden wird auf die dem Anwendungsfall angepasste Berechnung aus (Umeyama 1991) in Formel 5-3, Formel 5-4 und Formel 5-5 eingegangen. Unter Anwendung einer Singulärwertzerlegung (svd, singular value decomposition) können die Matrizen U , V aus der Matrixmultiplikation zwischen A_m und der transponierten B_m berechnet werden (Formel 5-3).

Aus der Matrizen U , V kann anschließend die Rotationsmatrix R bestimmt werden (Formel 5-4). Der Translationsvektor T kann abschließend durch die Differenz zwischen den rotierten ursprünglichen Punkteschwerpunkt $[X_A, Y_A, 0]$ und dem Schwerpunkt nach dem Greifvorgang $[X_B, Y_B, 0]$ ermittelt werden (Formel 5-5). Der Translationsvektor beschreibt die Verschiebung $[x, y]$ zwischen den einzelnen Ablagevorgängen und bildet nachfolgend die Grundlage der weiteren Betrachtung. Der Fokus der Betrachtung liegt auf den entstehenden Prozessstreuungen, die ermittelten Translationsvektoren je Versuchsreihe werden daher zentriert.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_{A1} & Y_{A1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{AN} & Y_{AN} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} X_{B1} & Y_{B1} & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{BN} & Y_{BN} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Formel 5-1}$$

$$X_{Am} = \frac{1}{N} \sum_1^N X_{An}, Y_{Am} = \frac{1}{N} \sum_1^N Y_{An} \quad X_{Bm} = \frac{1}{N} \sum_1^N X_{Bn}, Y_{Bm} = \frac{1}{N} \sum_1^N Y_{Bn} \quad \text{Formel 5-2}$$

$$\mathbf{A}_M = \mathbf{A} - \begin{bmatrix} X_{Am} & Y_{Am} & 0 \\ X_{Am} & Y_{Am} & 0 \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_M = \mathbf{B} - \begin{bmatrix} X_{Bm} & Y_{Bm} & 0 \\ X_{Bm} & Y_{Bm} & 0 \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}_M * \mathbf{B}_M^T; \text{ svd}(\mathbf{H}) = [\mathbf{U}, \mathbf{S}, \mathbf{V}^T] \quad \text{Formel 5-3}$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{V} * \mathbf{U}^T \quad \text{Formel 5-4}$$

$$\mathbf{T} = [X_B, Y_B, 0] - \mathbf{R} * [X_A, Y_A, 0] \quad \text{Formel 5-5}$$

Sämtliche Versuche wurden in 25-facher Wiederholung durchgeführt. Zur Einordnung der sich ergebenden Prozessstreuung werden die Versuchsergebnisse in Form einer Qualitätsregelkarte sowie eines Zielscheibendiagramms dargestellt. Als obere sowie untere Eingriffsgrenze wurden 0,1 mm gewählt. Aus den Werten wird weiterhin der Prozessfähigkeitsindex c_p berechnet. Für die Versuche werden daneben statistische Kennzahlen zur Beurteilung erhoben, siehe Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1 erhobene statistische Daten

Wert	Beschreibung
$\min_x, \max_x, \min_y, \max_y$	Minima und Maxima der Translation je Raumrichtung
σ_x, σ_y	Standardabweichung der gemessenen Translationen in x- sowie y-Richtung zwischen zwei Ablagevorgängen
σ_{xy}	Standardabweichung der euklidischen Distanz der Mittelpunkte zweier Ablagevorgänge

Weiterhin erlaubt die gewonnene Datengrundlage die Durchführung von Varianzanalysen, um Aussagen über die Signifikanz einzelner Faktoren und deren relativen Anteil an der Gesamtstreuung treffen zu können, siehe Tabelle 5-2. Für eine Erläuterung der Berechnung sei auf (Klein 2021, S. 41ff) verwiesen.

Tabelle 5-2 Werte der Varianzzerlegung nach (Klein 2014)

Wert	Beschreibung
f	Freiheitsgrad der Faktoren, entspricht der Anzahl der Faktorstufen weniger 1
f_{F2}	Freiheitsgrad des Streuungsfehlers $F2$, entspricht der Anzahl der Gesamtstichprobe weniger der Freiheitsgrade der Versuche weniger 1
SQ	Abweichungsquadratsumme vom Mittelwert
V	Schätzwert der Faktorvarianz
F	Fisher-Wert
SQ'	Korrigierte Abweichungsquadratsumme
p	Prozent-Bedeutung eines Faktors
$F2$	Streuungsfehler

Über den Fischer-Wert (F-Wert) kann eine Aussage über die Signifikanz der Messergebnisse getroffen werden. Dabei wird der ermittelte F-Wert mit dem kritischen F-Wert je Konfidenzintervall verglichen. F-Werte liegen dabei je Freiheitsgrad der Faktoren und des Streuungsfehlers tabelliert vor. Ist der F-Wert größer demjenigen des 99 % Konfidenzintervalls, so handelt es sich um ein signifikantes Ergebnis. Liegt er über dem kritischen F-Wert des 99,9 % Konfidenzintervalls, so handelt es sich um ein hochsignifikantes Ergebnis. Der prozentuale Wert der Bedeutung p gibt Aufschluss über die Anteile der Einflüsse zwischen einzelnen Faktoren. Der prozentuale Wert des Fehlers $F2$ hingegen resultiert aus Streuungen, die nicht durch die Faktoreinstellungen zu erklären sind. Dies beinhaltet unter anderem Streuungen aus der Messungenauigkeit.

5.2 Absichern der Anforderungserfüllung

Ein Flächengreifer übt durch den Unterdruck stets ein Kräftefeld aus. Dieses Kräftefeld wird nachfolgend als **Flächenkraft** bezeichnet. Die gesamte **Greifkraft** ergibt sich dann durch Integration des Kräftefeldes über die Greiffläche.

Letztlich erfolgt der Greifvorgang dadurch, dass lokal die ausgeübte Flächenkraft die Schwerkraft übersteigt. Eine Herausforderung ergibt sich vor allem beim Greifen biege-

schlaffer Materialien in Verbindung mit Bauteilen mit stochastischer, welliger Struktur. Dabei kann es vorkommen, dass an zwei Stellen des Bauteils gleichzeitig ein Greifvorgang initiiert wird. Deren Abstand zueinander am Greifer kann sich von dem projizierten Abstand der Bauteilpunkte zueinander unterscheiden. Bei biegesteifen Materialien kann dies zu einer Verschiebung führen, bei biegeschlaffen Materialien können Einschlüsse oder ein Faltenwurf die Folge sein (vgl. Weinmann 2022, Götz 1991, S. 88). Der Greifer soll daher im Folgenden nach Flächenkraft sowie Greifkraft charakterisiert werden, um bei späteren Untersuchungen Erklärungsmodelle ableiten zu können.

Beurteilung der Greifkraft in z-Richtung

In dem Versuch wurde der Greifer über einer Waage mit einer quadratischen Grundfläche von 130 mm Kantenlänge positioniert. Die Greiffläche wies runde Saugöffnungen mit einem Durchmesser von 1 mm auf, die quadratisch mit einem Abstand von 10 mm angeordnet sind. Die Greiffläche hat dabei eine Größe von 190 mm in der Breite sowie 360 mm in der Länge. Mit diesem Versuchsaufbau wurde die Flächenkraft verschiedener Abstände in z-Richtung ermittelt. Die Versuche wurden bei verschiedenen Versorgungsluftdrücken durchgeführt. Versuchsaufbau und Ergebnisse sind in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Grundfläche der Waage ist dabei deutlich kleiner als die des Greifers, so dass nur geringe Überdeckungsgrade erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass es bei vollständiger Überdeckung zu weniger Leckageströmung (vgl. Götz 1991, S. 100) kommt und dementsprechend höhere Flächenkräfte erzielbar sind. Es wird deutlich, dass mit dem Greifer das komplette Spektrum der in Kapitel 2.6.1 beschriebenen Bauteile gegriffen werden kann. Bereits bei einem Abstand von 1 mm hat sich die Greifkraft dabei um etwa den Faktor 4 verringert.

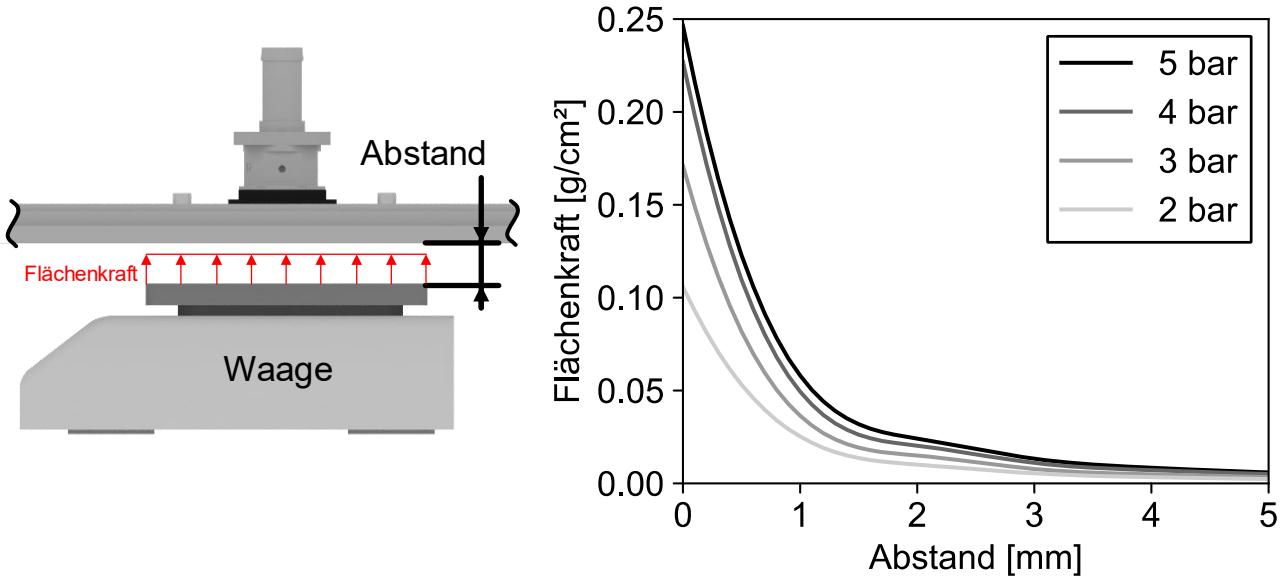
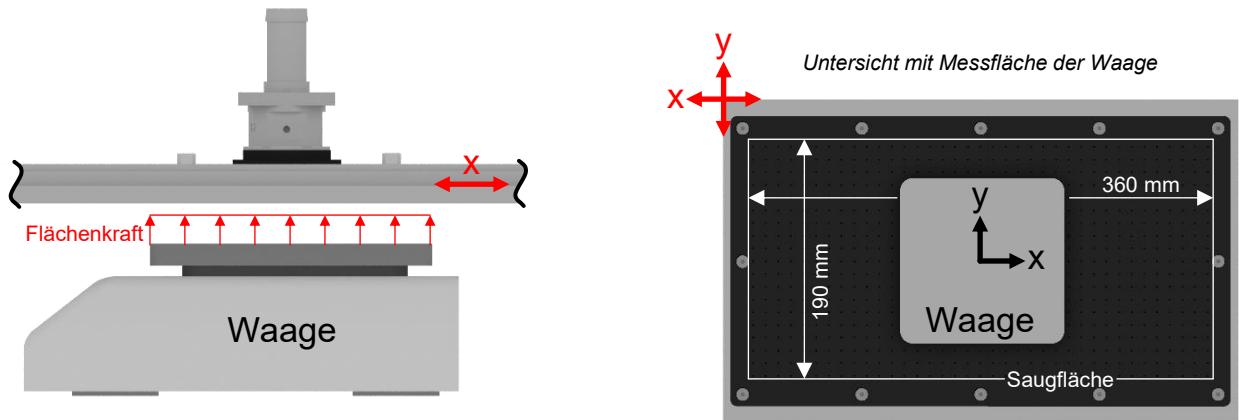


Abbildung 5-4 Greifkraft in Abhängigkeit von Versorgungsdruck und Abstand

Beurteilung der Homogenität der Flächenkraft

Der in Abbildung 5-4 in Seitenansicht dargestellte Versuchsaufbau wurde verwendet, um die Homogenität des Greifers in der Ebene zu ermitteln. Mit einem Versorgungs- luftdruck von 5 bar sowie einem Abstand von 1 mm wurde die Greiffläche in Schritten von 10 mm sowohl in x- als auch in y-Richtung verfahren. 10 mm entsprechen dabei genau dem gewählten Abstand der Saugöffnungen, so dass ein gleichbleibendes Überdeckungsverhältnis sichergestellt ist. Nach Erreichen der Zielposition wurde der Versorgungsluftdruck aktiviert und der Messwert wurde nach einer Einschwingphase erfasst. Bedingt durch die große Fläche der Feinwaage wird bei ± 20 mm in y-Richtung bereits gerade noch eine vollständige Überdeckung erreicht, in x-Richtung bei ± 100 mm. Die gemessene Kraft wurde mit der Fläche normiert und ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

Versuchsaufbau



Ergebnis

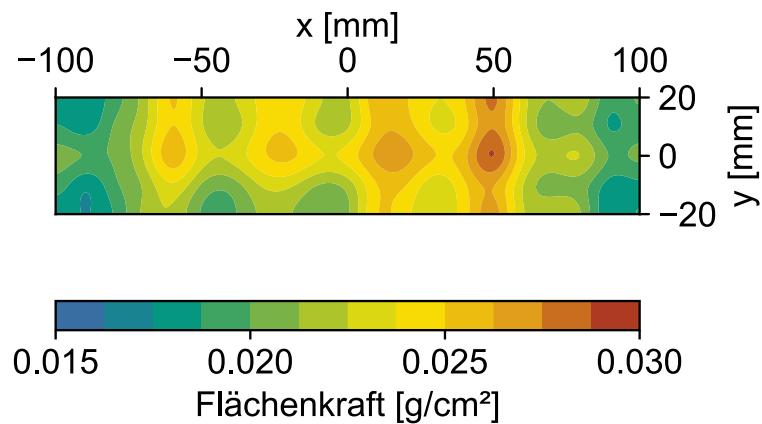


Abbildung 5-5 Gemessene Flächenkraft bei 5 bar mit einem Abstand von 1 mm

Deutlich zu erkennen ist eine periodische Struktur der Unterdruckverteilung, deren Periodenabstand in x-Richtung etwa 35 mm beträgt. Weiterhin fällt die Flächenkraft sowohl in x-Richtung als auch in y-Richtung zu den Rändern hin ab. Dies deckt sich mit dem in (Kuolt & Müller 2014) beschriebenen Verhalten, wobei dort keine periodische Struktur beschrieben ist. Vor allem vor dem Hintergrund des Greifens dünnster, biegeschlaffer Bauteile bergen die lokalen Schwankungen des Unterdrucks die Gefahr von Faltenwurf.

Beurteilung erzielbarer Tangentialkräfte

In den vorangegangenen Untersuchungen konnte vor allem das Kräftefeld des Greifers ermittelt werden. Dabei übersteigen die ermittelten Flächenkräfte die Flächengewichtskräfte des relevanten Bauteilspektrums, was als notwendige Bedingung für einen erfolgreichen Greifvorgang zu erfüllen ist. Zur Abschätzung

erreichbarer Dynamiken und Prozesssicherheiten ist abschließend eine Bewertung der erzielbaren Tangentialkräfte erforderlich. Aufgrund der sich ergebenden Oberflächenpaarung mit spezifischen Reibkoeffizienten sind die ermittelten Werte allerdings stets bauteilspezifisch. Bei Bipolarplatten kommt hinzu, dass Veränderungen im Flowfield ebenfalls Einfluss haben können. Aus diesem Grund wurde zur Durchführung des Versuchs eine MEA gewählt.

Der Greifer wurde in vertikaler Position am unteren Flansch einer Zugprüfmaschine befestigt. Der obere Bereich der MEA wurde zur besseren Einspannung mit einer zusätzlichen Subgasketfolie verstärkt. Im Anschluss daran wurde die Druckluftversorgung aktiviert und die Kraft genutzt. Mit einer Traversengeschwindigkeit von 50 mm/min wurde die MEA nach oben hin abgeschert. Die Versuche wurden unter geregelter Luftfeuchte durchgeführt. Der Teil der Greiffläche, der die MEA in der Einspannsituation nicht bedeckt, wurde mit einem Klebeband kaschiert, um Leckagen zu vermeiden. Die resultierenden Kraft-Weg-Verläufe inklusive der Maxima sind in Abbildung 5-6 dargestellt.

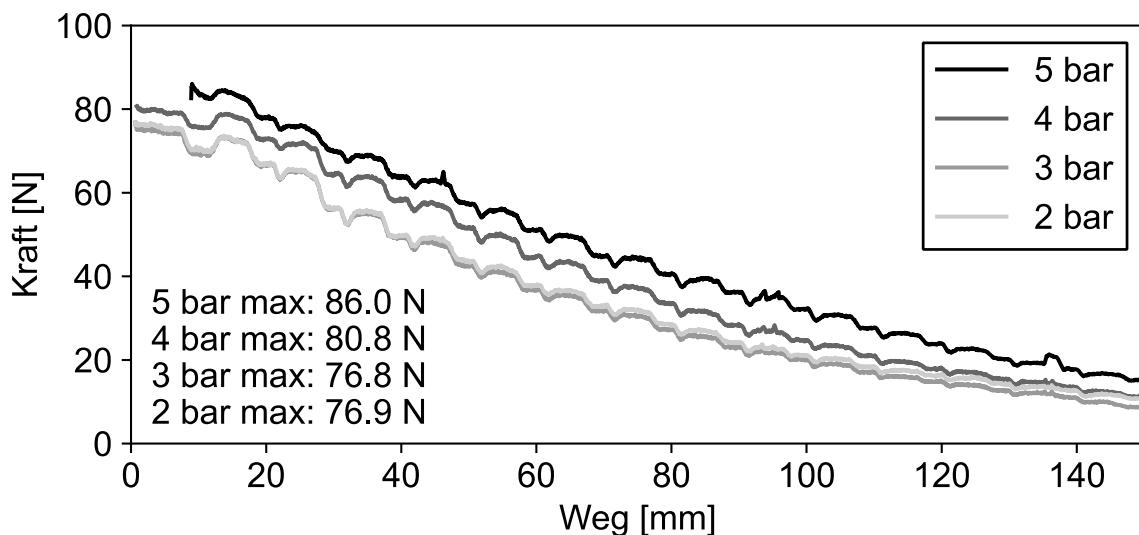


Abbildung 5-6 Tangentialkraft einer MEA

Das kurzfristige Absinken sowie erneute Ansteigen der Kraft liegt an dem erneuten Verdecken von Saugöffnungen im Bereich der Manifolds. Bei einer maximalen Kraft von 86 N für den größtmöglichen Betriebsdruck von 5 bar kann eine hohe Dynamik ertragen werden.

Aus dem Versuch kann das Verhalten des Greifers weiter charakterisiert werden. Es ist zu erkennen, dass der Kraftverlauf eine nichtlineare Kennlinie aufweist, obgleich die Kontaktflächenabnahme linear ist. Bei zunehmender Abdeckung des Greifers sinkt der

Anteil der Leckageströmung (vgl. Götz 1991, S. 100) und die erzeugte Kraft steigt an. Zuvor wurde bereits ermittelt, dass der Versorgungsluftdruck einen großen Einfluss auf das Kräftefeld des Greifers hat. So beträgt dieser bei 5 bar mehr als das Doppelte im Vergleich zu 2 bar (vgl. Abbildung 5-4). Durch die während des Greifens erfolgte Abdeckung ist der Einfluss während dieser Phase allerdings nur geringfügig. Folglich kann der Versorgungsluftdruck und damit auch der Druckluftverbrauch durch Absenkung während des Greifens ohne Produktivitätsverluste reduziert werden.

Schlussfolgerungen

Anhand der ermittelten Kennlinien des Greifers kann eine deutliche Wechselwirkung zwischen Greifer und Material bereits vermutet werden. Greifkraft und Abstand stehen dabei in einem nichtlinearen Zusammenhang, so dass lokale Abweichungen in z-Richtung, beispielsweise durch Welligkeiten, verstärkt werden. Durch zusätzliche Inhomogenität innerhalb eines Greifers ist zu vermuten, dass biegeschlaffe Bauteile nur dann prozesssicher gegriffen werden können, wenn der Greifer auf dem Bauteil aufliegt. Mit zunehmender Biegesteifigkeit eines Materials kann zur Optimierung der Prozesszeit hingegen bereits bei Annäherung ein Vakuum erzeugt werden.

5.3 CCM

Bei der CCM handelt es sich bei der Brennstoffzellenfertigung um das biegeschlaffste und dünnste Bauteil, gleichzeitig beeinflusst die Luftfeuchtigkeit die mechanischen Eigenschaften einer CCM. Bedingt durch Vorprozesse sowie Unterschiede in anoden- und kathodenseitiger Beschichtung weist die Membran stets geringe Eigenspannungen auf. Es konnte beobachtet werden, dass es in der Folge zu geringfügigem Einrollen der Membran kommt. Die Versuche wurden daher in kontrollierter Atmosphäre bei 50 % relativer Luftfeuchte durchgeführt. Aufgrund des Einrollens der Membran ließen sich keine Versuche bei abweichender Luftfeuchtigkeit durchführen. Aufgrund der dimensionalen Änderungen war eine Vermessung der CCM außerhalb des feuchtege Regelten Versuchsraums nicht möglich. Ermittelte Verschiebungen beziehen sich auf den Mittelpunkt der Referenzmarker. Der Einfluss nachfolgender Merkmale auf die Stapelgenauigkeit wird im Folgenden untersucht:

- Greif- und Ablagevorgang durch Wiederholversuche
- Einfluss der Umgebungsbedingungen durch Dimensionsmessungen bei Luftfeuchteänderungen
- Einfluss der Materialeigenschaften durch Literaturwerte

- Einfluss der Maschinentechnik durch Literaturwerte

Wiederholversuche Greifen

Die Wiederholversuche wurden mit dem in Abbildung 5-2 dargestellten Versuchsaufbau ermittelt. Dargestellte Verschiebungen wurden nach Formel 5-5 ermittelt und sind zentriert dargestellt. In Vorversuchen wurde ermittelt, dass ein prozesssicheres Greifen der CCM ausschließlich im Nullabstand möglich ist. Abstände während des Ablegens sorgen für einen Luftkisseneffekt unterhalb des Bauteils, auf dem die Membran wegleiten kann.

Die Versuche wurden zunächst ohne Vakuumtisch durchgeführt. Insbesondere entlang der langen Seite der Membran kam es zu deutlichen Verschiebungen (siehe Abbildung 5-7).

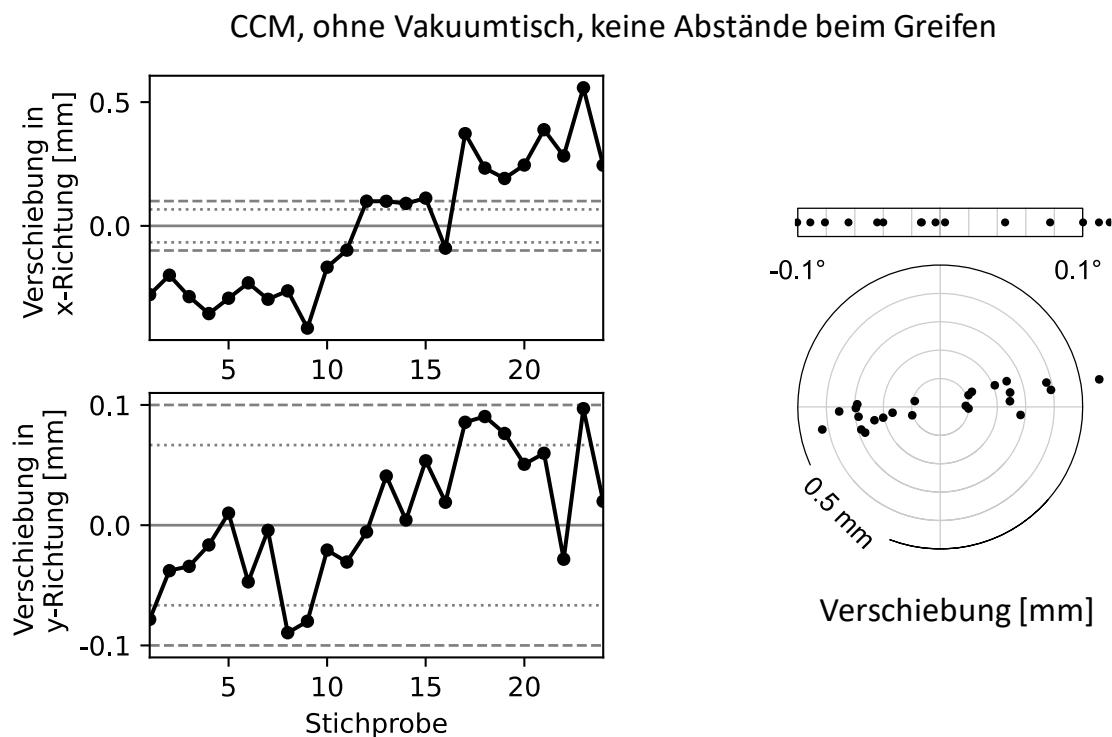


Abbildung 5-7 Wiederholversuche (CCM), kein Abstand, kein Vakuumtisch

Mit Beschichtungsdicken in der Größenordnung von $10 \mu\text{m}$ (Banas et al. 2018), sowohl anoden- als auch kathodenseitig, bestimmt diese maßgeblich die mechanischen Eigenschaften. Die Beschichtung zeigt ein unterschiedliches mechanisches Verhalten im Vergleich zu dem Substratmaterial. Weiterhin sind die Beschichtungen anodenseitig und kathodenseitig nicht identisch. Durch Vorprozesse sowie durch das Quellverhalten

können in der Beschichtung Eigenspannungen entstehen. Ohne eine wirkende externe Kraft kann es dabei energetisch günstiger sein, wenn sich diese Eigenspannungen in Form von Welligkeiten abbauen. Dies kann zwei unterschiedliche Folgen haben, die in Abbildung 5-8 schematisch dargestellt sind und im Folgenden beschrieben werden.

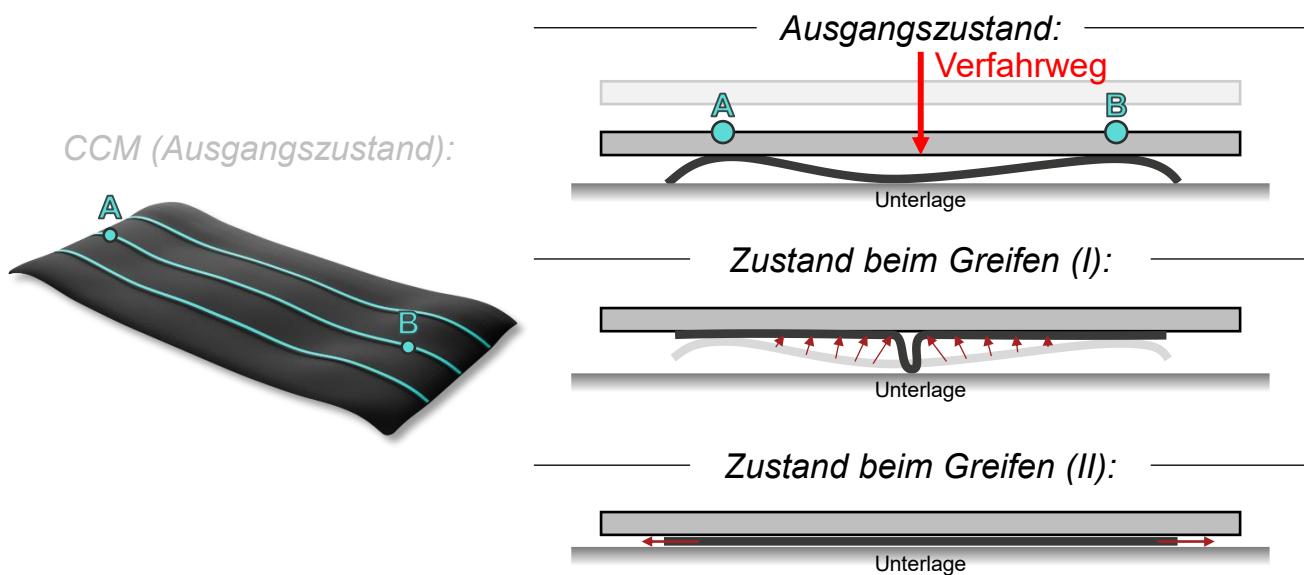


Abbildung 5-8 Einfluss der Welligkeit auf den Greifvorgang

- (I) Sofern während des Greifens ein geringer Abstand zwischen Greifer und Bauteil gegeben ist, erfolgt das Greifen an zwei unterschiedlichen Stellen gleichzeitig (A,B). Da die projizierte Strecke am Bauteil ($d_{AB,CCM}$) größer ist als der Abstand der Punkte am Greifer ($d_{AB,Greifer}$) kommt es zu einer Faltenbildung, wenn die Flächenkraft (rote Pfeile) größer ist als der Biegewiderstand, der sich durch Verformung des Bauteils ergibt.
- (II) Erfolgt das Greifen des Bauteils ohne Distanz zwischen Greifer und Bauteil, so wird die CCM zunächst flach gedrückt. Dabei kommt es zu einer Relativverschiebung der CCM, wobei deren Richtung von den entstehenden Kontaktflächen und deren Reibwerten abhängt. Aufgrund der Vielfältigkeit dieser Einflüsse entsteht eine stochastische Verschiebung.

Abbildung 5-7 zeigt die Ergebnisse eines Greifvorgangs ohne Verwendung eines Vakuumtisches. Deutlich zu erkennen ist, dass die Abweichung entlang der langen Seite (in x-Richtung) deutlich größer als diejenige der kurzen Seite (in y-Richtung) ist.

Beim Greifen ohne Vakuumtisch zeigt sich, dass sich zwischen den beiden Raumrichtungen deutliche Unterschiede in der Wiederholgenauigkeit ergeben. Dies

lässt sich dadurch begründen, dass sich die Welligkeit bevorzugt entlang der längeren Bauteilrichtung ausbildet (siehe schematische Darstellung in Abbildung 5-8).

Erklärungsmodell zur Welligkeit: Durch Unterschiede in der Beschichtung der Kathode und Anode kommt es zu Eigenspannungen an der Oberfläche. Diese Eigenspannungen bewirken eine Kraft, die zu einer Biegekraft in der Membran führt. Ist die Biegekraft nun größer als die Gewichtskraft, so kommt es zu einer Faltenbildung. Aufgrund unterschiedlicher Abmaße des Bauteils ist die zu verrichtende Arbeit jedoch an der langen Seite geringer als an der kurzen Seite. Die Welligkeit zeigt sich daher vorrangig entlang der langen Seite des Bauteils. In der Folge kommt es bei Greifvorgängen zu einer Relativverschiebung des Bauteils und die geforderte Positioniergenauigkeit kann nicht erreicht werden.

In (Götz 1991, S. 86) wurde zur Vermeidung von Lageverschiebungen ein schräges Ansetzen des Greifers empfohlen. In Vorversuchen führte dies bei einer CCM jedoch zu erhöhter Faltenbildung. Der in (Götz 1991, S. 86) aufgestellten These liegt die Vermutung zugrunde, dass ein Greifer homogenes, statisches Druckfeld erzeugt. Anhand der durchgeföhrten Messungen (siehe Abbildung 5-5) wurde gezeigt, dass der Flächengreifer kein homogenes Feld ausbildet. Folglich kann es auch bei schrägem Aufsetzen zu einem undefinierten Zustand und gleichzeitigem Greifen (vgl. Abbildung 5-8) kommen. Aus diesem Grund wurden die Versuche unter Verwendung eines Vakuumtisches wiederholt (vgl. Abbildung 5-3, Pneumatikventil 2). Streuungen für die Ablage ohne sowie mit Vakuumtisch sind in Tabelle 5-3 aufgeführt. Abbildung 5-9 visualisiert die Ergebnisse der Wiederholversuche des Greifens der CCM mit Vakuumtisch. Die Standardabweichung der Position beträgt dabei $8,5 \mu\text{m}$, der Prozess ist fähig und beherrscht. Es zeigt sich, dass eine prozesssichere Handhabung der CCM ausschließlich unter Verwendung eines Vakuumtisches möglich ist.

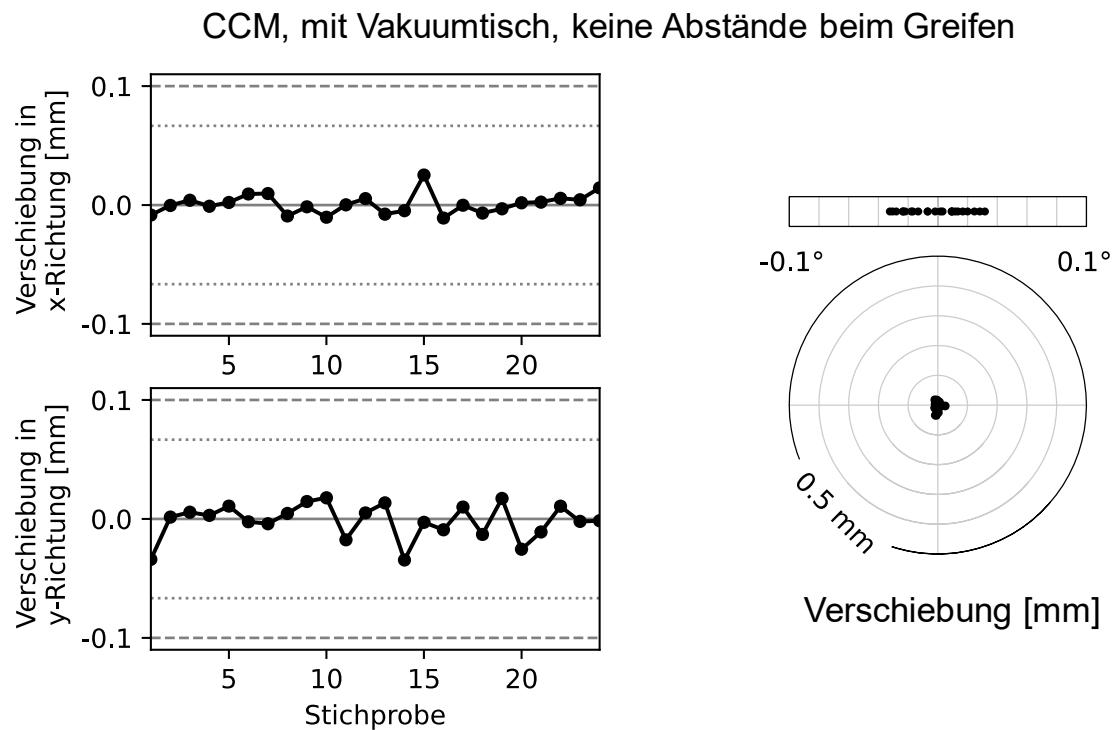


Abbildung 5-9 Wiederholversuche (CCM), kein Abstand, mit Vakuumtisch

Tabelle 5-3 Streuungen der Ablagegenauigkeit (CCM)

		min [μm]	max [μm]	σ [μm]	σ_{abs} [μm]	$C_{p(\text{abs})}$ [-]
Ohne	x	- 414,0	557,9	271,5		
Vakuumtisch	y	- 97,3	97,3	54,0	117,2	0,28
Mit	x	- 19,6	25,2	8,3		
Vakuumtisch	y	- 34,5	17,8	14,5	8,5	3,92

Ermittlung des Einflusses der Umgebungsbedingungen

Zur Gewährleistung der Protonenleitfähigkeit einer Membran ist es erforderlich, dass diese Wasser aufnehmen kann. Die Wasseraufnahme führt allerdings unweigerlich zu einer Änderung der mechanischen Eigenschaften. Zum einen verändert sich der Elastizitätsmodul, zum anderen längt oder verkürzt sich die Membran. In Abbildung 5-10 ist die Verformung einer CCM (Gore Primea A510.1/M765.08/C586.4) bei einer Änderung der Luftfeuchtigkeit vom Ausgangspunkt RH = 50 % zu RH = 25 % sowie RH = 75 % dargestellt. Dabei wurden auf der CCM Marker aufgebracht, deren Position mittels GOM Atos Q erfasst wurde. Um ein Aufrollen zu verhindern, wurde die Membran in einem Abstand von 0,7 mm unter einem Gitter platziert.

In Tabelle 5-4 sind die dabei erfassten Dehnungen in MD und TD dargestellt. Die untersuchte Membran weist nur eine geringe Anisotropie auf, das Ausdehnungsverhalten ist nur näherungsweise linear. Aufgrund der hohen Sensitivität kleinster Luftfeuchtigkeitsschwankungen und einer schwierigen Regelung dieser lässt sich das Verhalten jedoch nicht genauer bestimmen. Zur Ermittlung des Einflusses soll der Verlauf daher als näherungsweise linear angenommen werden, Zwischenwerte werden durch Interpolation bestimmt.

Für eine Membran der Länge 200 mm (TD) und der Breite 100 mm (MD) ergibt sich auf Grundlage von Tabelle 5-4 bei einer Änderung der Luftfeuchtigkeit von $\pm 1\%$ eine Maßabweichung von $\pm 0,038\text{ mm}$ in der Länge und $\pm 0,019\text{ mm}$ in der Breite.

Die experimentell ermittelten Zusammenhänge sind insbesondere dann relevant, wenn sich die Luftfeuchtigkeit zwischen dem Zuschnitt und der Assemblierung ändert. Während der Versuche konnte keine dimensionale Änderung durch die Greifvorgänge festgestellt werden. Luftströme, insbesondere durch trockene Druckluft, müssen in einer Produktionsumgebung jedoch gegebenenfalls detailliert betrachtet werden.

Zusammenfassung: In Hinblick auf die Ablagegenauigkeit ist eine prozesssichere Handhabung der CCM gewährleistet, wenn sichergestellt ist, dass die CCM stets in einem gespannten Zustand vorliegt. Es ist vorteilhaft, wenn der Schneidvorgang unter den identischen atmosphärischen Bedingungen wie der Stapelvorgang durchgeführt wird. Darüber hinaus ist es in einem Maschinenkonzept zur MEA-Herstellung anzustreben, dass eine CCM zu jedem Zeitpunkt in einem gespannten Zustand vorliegt, um Faltenbildung und in der Folge Lageverschiebungen zu vermeiden.

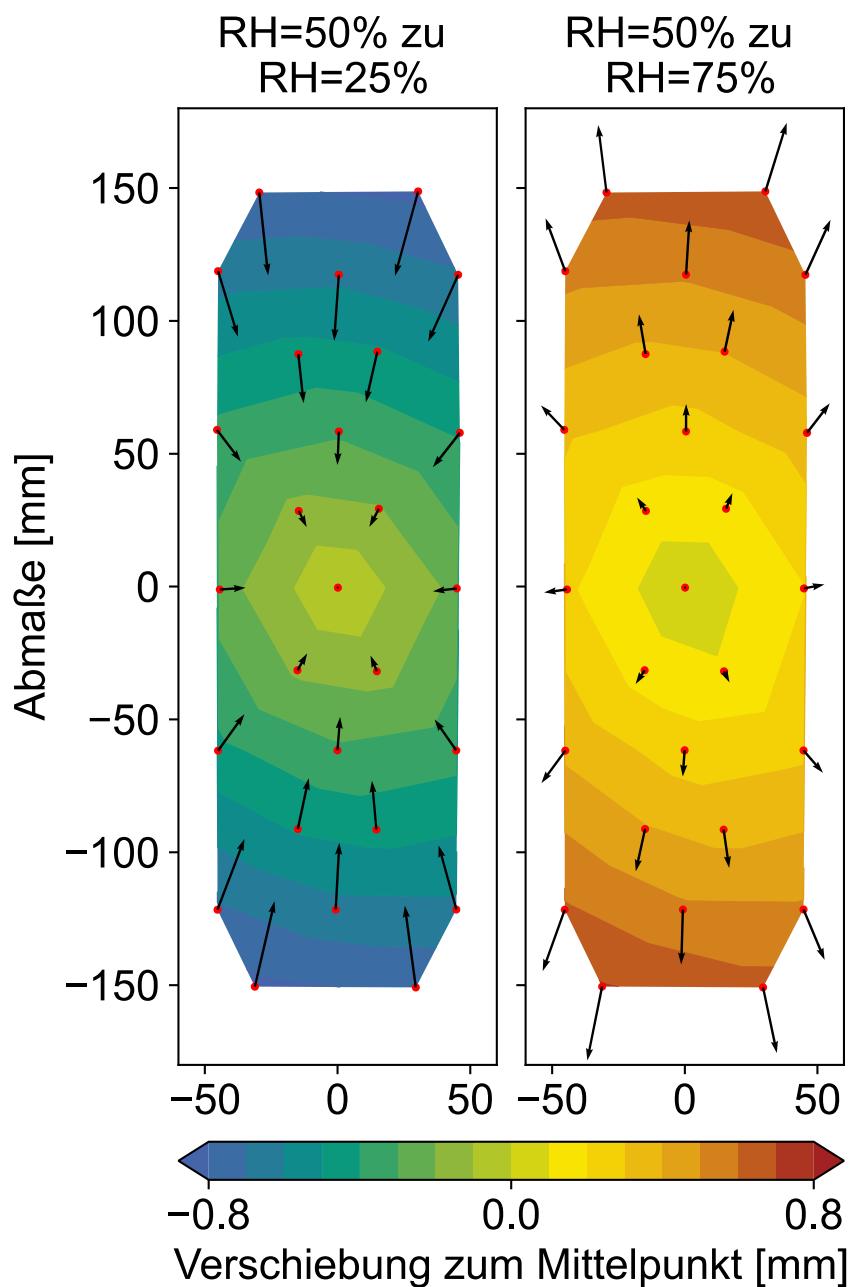


Abbildung 5-10 Verformung einer CCM bei veränderter Luftfeuchte

Tabelle 5-4 Dehnung Gore Primea A510.1/M765.08/C586.4

von RH = 50 %	MD	TD
Trocknung zu RH = 25 %	- 0,51 %	- 0,53 %
Befeuchtung zu RH = 75 %	0,46 %	0,43 %
Mittlere Dehnung		0,019 % je RH%

5.4 GDL

Zur Herstellung einer 7-Lagen-MEA muss eine GDL gegriffen und auf einer 5-Lagen MEA abgelegt werden. Zur Befestigung muss zuvor Klebstoff auf MEA oder GDL aufgebracht werden (vgl. Kim & Lee 2017). Aufgrund des notwendigen Fügevorgangs kann davon ausgegangen werden, dass es nach der Ablage zu keiner Relativbewegung kommt. Die Versuche wurden daher unter Verwendung des Vakuumtischs durchgeführt, der ähnlich zu einer Klebung kein Verrutschen nach dem Ablegen erlaubt. Für die Versuche wurde eine GDL des Herstellers Freudenberg (H14CX653) verwendet. Dafür wurde ein Einzelsheet aus der Rollenbahn ausgeschnitten. Die GDL ist deutlich biegesteifer als die Membran. Das Bauteil weist keine Welligkeiten auf, eine geringe Restbiegung durch die Aufwicklung und Bereitstellung als Coil ist zu beobachten. Die GDL wurde auf der unbeschichteten Seite gegriffen. Zur Vorbereitung wurde die GDL auf einem Flachbettscanner erfasst (Abbildung 5-11). Die Kanten der GDL wurden erfasst (rot), anhand deren Schnittpunkte wurden die Ecken bestimmt (Punkte 30-33). Anhand dieser wurde der Bauteilmittelpunkt bestimmt und ein Koordinatensystem definiert.

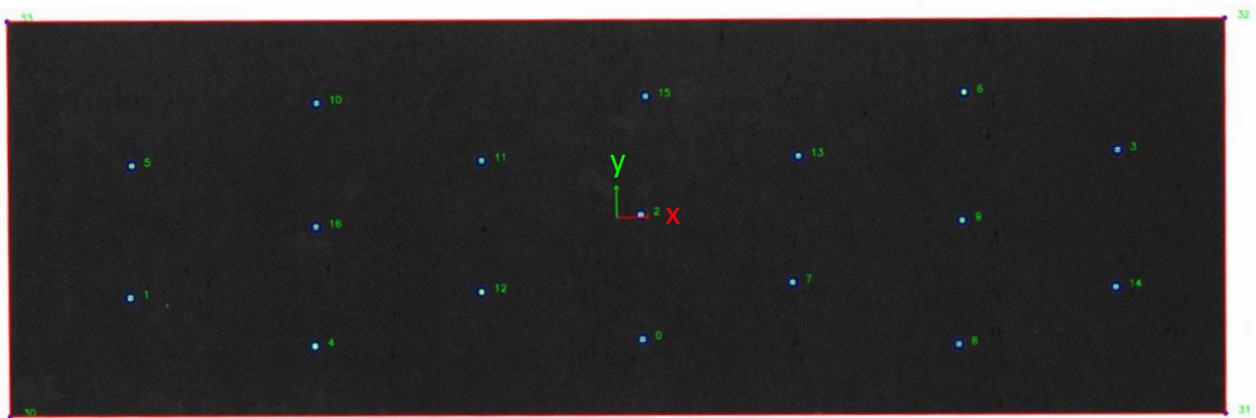


Abbildung 5-11 verwendet GDL mit Referenzmarkern und Bauteilzentrum

Die Prozessfähigkeit soll ebenfalls bei einem Greifen mit 5 mm Entfernung bewertet werden. Dies spiegelt den Fall wider, dass der Greifer bereits im Annäherungsvorgang mit Druckluft versorgt wird, wodurch eine Taktzeitverkürzung erreicht werden kann.

Die Messergebnisse sind in Abbildung 5-12 dargestellt, minimale und maximale Verschiebungen, Standardabweichungen und Prozessfähigkeitsindex in Tabelle 5-5 genannt.

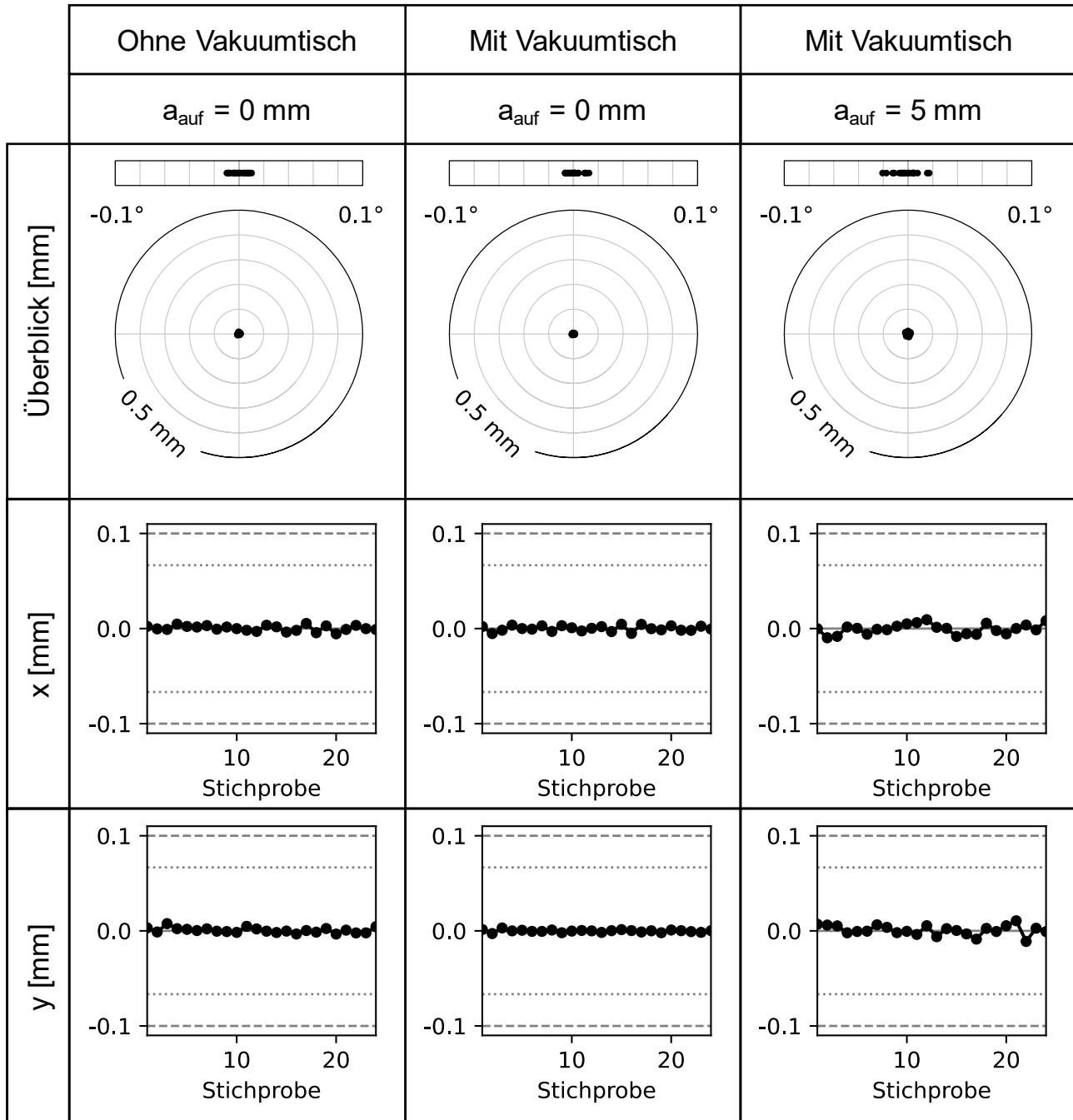


Abbildung 5-12 Ergebnisse der Wiederholversuche (GDL)

Tabelle 5-5 Streuung der Ablagegenauigkeit (GDL)

		min [µm]	max [µm]	σ [µm]	σ _{abs} [µm]	c _{p(abs)} [-]
0 mm, ohne	x	- 5,2	4,6	2,8		
Vakuumtisch	y	- 2,9	3,0	1,3	1,5	21,75
0 mm, mit	x	- 5,5	5,5	2,8		
Vakuumtisch	y	- 3,4	7,5	2,6	1,7	19,69
5 mm, mit	x	- 9,6	9,4	5,1		
Vakuumtisch	y	- 11,2	10,6	5,0	3,2	10,56

Für die Bauteilverschiebungen wurde darüber hinaus eine Varianzanalyse durchgeführt. Zunächst wurde bei 0 mm Aufnahmeabstand der Einfluss der Verwendung eines Vakuumtischs untersucht (Tabelle 5-6). Die Verwendung eines Vakuumtischs hat hochsignifikanten Einfluss auf erreichbare Genauigkeiten. Da für sämtliche Einstellungen eine Prozessfähigkeit nachgewiesen werden konnte, wurde die Ursache der größeren Abweichung in y-Richtung nicht weiter untersucht.

Tabelle 5-6 Varianzanalyse (GDL, a_{auf} = 0 mm, mit/ohne Vakuumtisch)

	f	SQ [µm ²]	V [µm ²]	F _A	SQ' [µm ²]	p [%]
Vakuumtisch	1	464,8	464,8	189,5	462,4	80,0
F ₂	46	115,3	2,4	-	115,3	20,0
$F_{krit,48,1,95\%} = 4,05, F_{krit,48,1,99\%} = 7,22, F_{krit,48,1,99,9\%} = 12,35$						

In Tabelle 5-7 ist die Varianzanalyse bei Variation des Abstandes a_{auf} dargestellt. Der Abstand hat in dem untersuchten Bereich von 0 mm und 5 mm einen hochsignifikanten Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit.

Tabelle 5-7 Varianzanalyse (GDL, a_{auf} = 0 mm – 5 mm, mit Vakuumtisch)

	f	SQ [µm ²]	V [µm ²]	F _A	SQ' [µm ²]	p [%]
a _{auf}	1	1199,1	1199,1	208,9	1193,3	81,6
F ₂	46	264,1	5,7	-	269,8	18,4
$F_{krit,48,1,95\%} = 4,05, F_{krit,48,1,99\%} = 7,22, F_{krit,48,1,99,9\%} = 12,35$						

Zusammenfassung: Mit den gewählten Einstellungen konnte im untersuchten Parameterraum eine Prozessfähigkeit nachgewiesen werden. Sofern die GDL direkt aus dem Zuschnitt bereitgestellt wird, ist keine Ausrichtung erforderlich. Der Einfluss des Handhabungssystems auf die Gesamttoleranz ist gering. Produkttoleranzen ergeben sich somit vorrangig aus der Zuschnittsgenauigkeit vorangegangener Prozesse sowie der Bereitstellungsgenauigkeit.

5.5 7-Lagen-MEA

Die verwendete MEA weist eine Dicke von 400 µm auf. Sämtliche nachfolgend definierten Abstände beziehen sich auf den Abstand zwischen dem Greifer und Bauteiloberfläche. Abbildung 5-13 zeigt die verwendete MEA inklusive der Referenzmarker. Zur Vorbereitung wurde die MEA vollständig befeuchtet und auf einem Flachbettscanner erfasst. Die Kanten der MEA wurden bestimmt (rot), anhand der Schnittpunkte wurden die Ecken bestimmt (Punkte 30-33). Anhand dieser wurde der Bauteilmittelpunkt bestimmt und ein Koordinatensystem definiert.

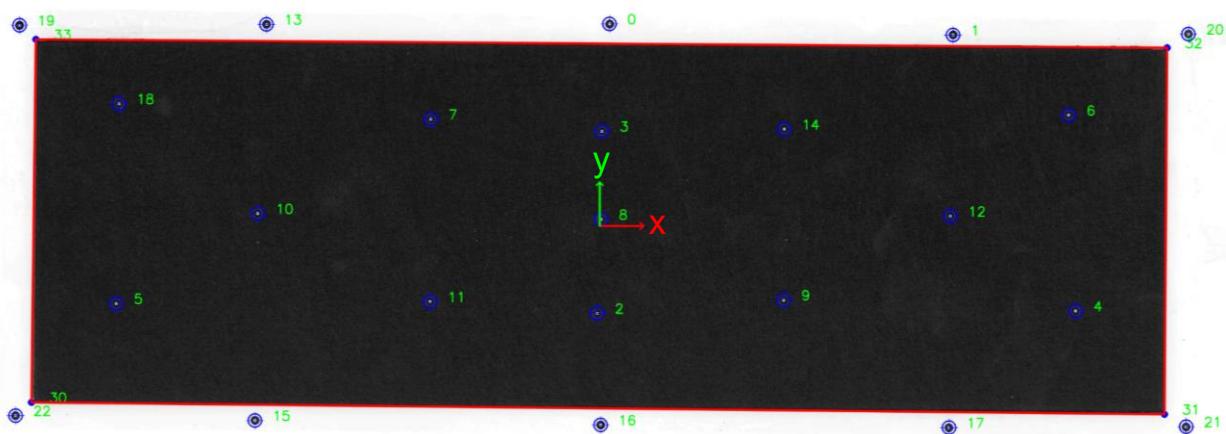


Abbildung 5-13 verwendet MEA mit Referenzmarkern und Bauteilzentrum

Einfluss der Luftfeuchte auf die Bauteilgeometrie

Für die MEA gilt, wie auch für die CCM, dass die Luftfeuchtigkeit der Umgebung erheblichen Einfluss auf die Bauteileigenschaften hat. Wie zuvor ermittelt kontrahiert sich die CCM bei Abnahme der Luftfeuchtigkeit und expandiert bei Zunahme der Luftfeuchtigkeit. Während der Herstellung der MEA wird damit der aktuelle Zustand der CCM fixiert. Eine Reduktion der Luftfeuchtigkeit führt folglich zu Zugspannungen, die Druckspannungen in der GDL hervorrufen und zu einem Aufbeulen führen, sofern die GDL nur im Randbereich befestigt ist.

Um diesen Effekt zu ermitteln, wurde die MEA in einem Vorversuch im Bereich der Manifolds mittels Klebestreifen auf einer Kunststoffunterlage fixiert. Es wurden Referenzmarker auf der oben liegenden GDL aufgebracht. Die Referenzmarker wurden wie in den vorherigen Versuchen durch eine Stereokamera (GOM Atos Q) erfasst. Das Messfeld deckte dabei die rechte Hälfte des Bauteils ab. Zur vollständigen Visualisierung wurde eine Symmetrieeachse mittig im Bauteil eingefügt.

Daraufhin wurde eine Luftfeuchtigkeit von 75 %, 50 % und 25 % eingestellt. Die Expositionsdauer wurde dabei so lange gewählt, dass von einer vollständigen Sättigung in der jeweiligen Atmosphäre ausgegangen werden kann.

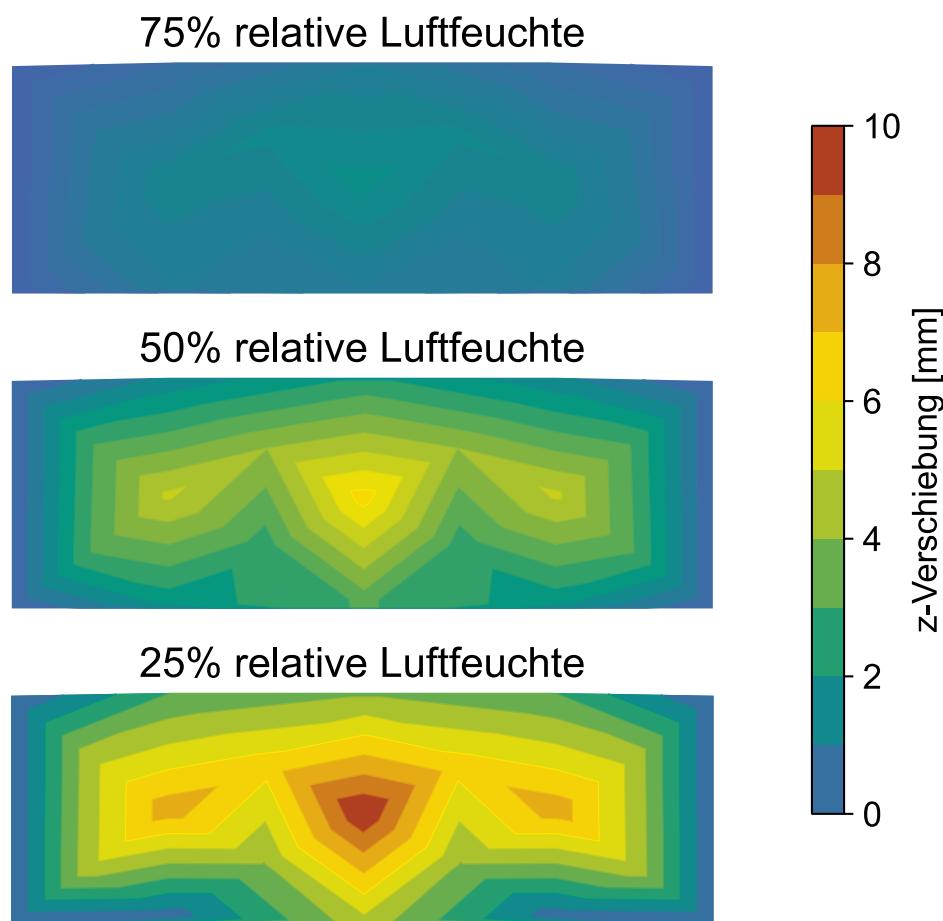


Abbildung 5-14 z-Abweichung einer MEA bei verschiedenen Luftfeuchten

In Abbildung 5-14 ist die z-Abweichung im Bereich der GDL bei den untersuchten Luftfeuchtigkeiten dargestellt. Bereiche zwischen den Messpunkten wurden zur Visualisierung interpoliert. Es wird deutlich, dass die MEA vermutlich bei einer hohen Luftfeuchtigkeit hergestellt wurde, da bereits eine Luftfeuchtigkeit von 50 % zu einer Deformation führt. Prozessparameter während der Herstellung der MEA als auch deren verwendete Materialien sind unbekannt.

Ort und Betrag der starken Ausbeulung können stochastisch variieren. Dies wiederum kann bei der Handhabung der Bauteile zu wechselnden Bedingungen führen und soll nachfolgend ebenfalls untersucht werden. Aufgrund der vorherigen Untersuchung wird die Annahme getroffen, dass die MEA bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 %

assembliert wurde. Die Werte werden als Ausgangspunkt angesehen, um den Einfluss der Reduktion der Luftfeuchtigkeit zu untersuchen.

Einfluss der Prozessparameter Aufnahmeabstand und Ablageabstand auf die Positioniergenauigkeit

Die Aufnahme- und Ablageabstände wurden zwischen 0 mm, 2,5 mm und 5 mm variiert, die entsprechenden Zielscheibendiagramme sind in Abbildung 5-15 dargestellt, statistische Daten der Versuche sind in Tabelle 5-8 aufgeführt.

Tabelle 5-8 Statistische Auswertung der Ablagegenauigkeit (MEA, RH = 70 %)

a_{auf} [mm]	a_{ab} [mm]		min [μm]	max [μm]	σ [μm]	σ_{abs} [μm]	$C_{p(\text{abs})}$ [-]
0,0	0,0	x	- 9,9	23,3	9,5	5,9	5,62
		y	- 5,6	5,6	9,5		
0,0	2,5	x	- 16,1	8,2	5,0	3,8	8,77
		y	- 4,0	8,6	5,0		
0,0	5,0	x	- 43,0	117,8	42,3	28,4	1,17
		y	- 45,5	99,1	42,3		
2,5	0,0	x	- 6,9	7,7	4,4	2,1	15,52
		y	- 3,9	2,4	4,4		
2,5	2,5	x	- 10,9	6,6	4,4	2,6	12,66
		y	- 03,9	2,5	4,4		
2,5	5,0	x	- 54,2	115,3	39,1	69,5	0,48
		y	- 90,8	275,3	39,1		
5,0	0,0	x	- 61,4	85,7	23,4	21,1	1,58
		y	- 29,1	28,0	23,4		
5,0	2,5	x	-1170,0	1147,2	341,9	329,4	0,10
		y	- 230,5	233,7	341,9		
5,0	5,0	x	- 317,2	388,3	142,2	116,5	0,29
		y	- 103,9	224,2	142,2		

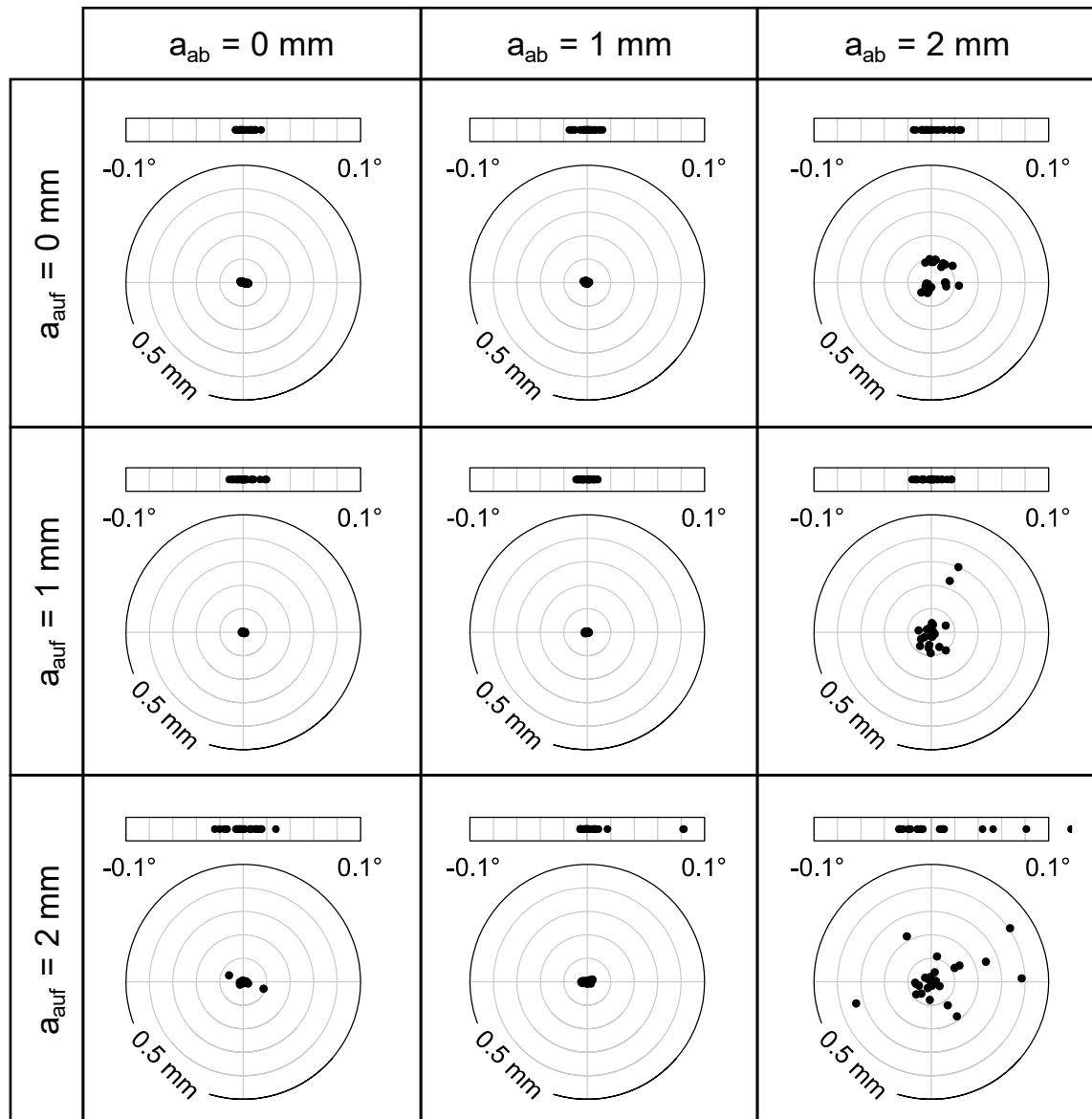


Abbildung 5-15 Ablagegenauigkeit einer MEA, RH = 70 %

Tabelle 5-9 liefert eine Varianzzerlegung der in Abbildung 5-15 dargestellten Messwerte. Für die Messwerte bei $RH = 70\%$ wurden die Quadratsummen (SQ), die Varianzen (V), F-Werte sowie absolute Streuungsanteile (SQ') und deren relative Anteile p berechnet. Sowohl Aufnahme- als auch Ablagehöhe haben jeweils drei Faktorstufen (0 mm; 2,5 mm; 5 mm) und damit jeweils zwei Freiheitsgrade $f_{a,auf} = f_{a,ab} = 2$. In Summe wurden $24 * 9 = 216$ Wiederholungen durchgeführt, somit beträgt der Freiheitsgrad $f_{F2} = 216 - 2 - 2 - 1 = 211$.

Sowohl der Abstand während des Aufnehmens als auch der Abstand während des Ablegens sind hochsignifikant. Beide tragen in etwa gleichem Maß zu den gemessenen Positionsabweichungen bei. Der Anteil der Positionsabweichungen, die nicht auf die Variation der Parameter a_{auf} und a_{ab} zurückzuführen ist, beträgt etwa 70 % und umfasst sonstige Prozessschwankungen sowie Messunsicherheiten.

Tabelle 5-9 Varianzanalyse der Greifabstände (MEA, RH = 70 %)

	f	SQ [μm^2]	V [μm^2]	F_A	SQ' [μm^2]	p [%]
a_{auf}	2	547461	286092	23,1	547461	14,4
a_{ab}	2	594946	309834	25,1	594947	15,7
F_2	211				2657748	69,9
						$F_{\text{krit},211,2,95\%} = 3,04, F_{\text{krit},211,2,99\%} = 4,71, F_{\text{krit},211,2,99,9\%} = 7,14$

Die höchste Genauigkeit über alle Versuche hinweg konnte bei 70 % relativer Luftfeuchte bei einem geringen Abstand von 2,5 mm während der Aufnahme und keinem Abstand während der Ablage erzielt werden. Unter Berücksichtigung von Abbildung 5-14 entspricht dies der Luftfeuchtigkeit, bei der keine Deformation der MEA zu erkennen ist.

Bei großen Abständen während der Ablage (5 mm) kann keine Prozesssicherheit gewährleistet werden. Ebenso kann die Prozesssicherheit nicht gewährleistet werden, wenn während des Greifens ein Abstand vorhanden ist.

Die Versuche wurden mit einem Aufnahmeabstand von 2,5 mm sowie einem Ablageabstand von 2,5 mm bei relativen Luftfeuchtigkeiten $RH = [60, 65, 70, 75] \%$ wiederholt. Der Freiheitsgrad beträgt damit $f = 3$. In Summe wurden $24 * 4 = 96$ Wiederholungen durchgeführt, somit beträgt der Freiheitsgrad $f_{F2} = 96 - 3 - 1 = 92$. Die Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 5-10 dargestellt. Die Luftfeuchtigkeit hatte in den Versuchen einen hochsignifikanten Einfluss auf die Ablagegenauigkeit.

Tabelle 5-10 Varianzanalyse (MEA, RH = 60 - 65 - 70 - 75 %)

	f	SQ [μm^2]	V [μm^2]	F_A	SQ' [μm^2]	p [%]
Luftfeuchtigkeit	3	18610	6203	66,5	18330	67,4
F_2	92	8585	93	-	8865	32,6
$F_{\text{krit},92,3,95\%} = 2,70, F_{\text{krit},92,3,99\%} = 4,00, F_{\text{krit},92,3,99,9\%} = 5,90$						

In der Auswertung der z-Position der Referenzmarker ließ sich feststellen, dass die Position der MEA nach der Ablage durch das Aufbeulen nicht stabil ist. Die Auftretenswahrscheinlichkeit ist allerdings gering, so dass innerhalb des gewählten Versuchsumfangs keine Aussage getroffen werden kann.

Fazit: Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Positionierung

Eine zu geringe Luftfeuchtigkeit führt zu einer Aufwölbung der GDL. Bei geringen Abständen besteht die Gefahr einer Beschädigung während der Bauteilaufnahme sowie der Bauteilablage. Bei hoher Luftfeuchtigkeit nimmt das Flächengewicht zu. Ein Greifen mit hohen Abständen von 5 mm ist daher nicht mehr möglich.

Aufgrund der Unsicherheiten aber auch aufgrund der zusätzlichen Belastung der CCM während des Stapelns sollte der Stapelprozess daher in kontrollierter Atmosphäre durchgeführt werden. Ein zusätzliches Verbinden zwischen CCM und GDL kann die Einflüsse der Feuchtigkeit weiter minimieren. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass es sich dabei um die aktive Fläche einer Zelle handelt und die elektrochemischen Eigenschaften dieser verändert werden können.

Zur Erreichung möglichst präziser Ergebnisse ist die Stapelung daher in jedem Fall in einer Produktionsumgebung mit kontrollierter Luftfeuchtigkeit durchzuführen.

Um eine vergleichende Bewertung zwischen dem Einfluss der Ablagehöhen sowie der Luftfeuchtigkeit zu erhalten, soll abschließend evaluiert werden, welcher der Faktoren einen größeren Einfluss auf die Positionsabweichungen ausübt. Es wurden die

relativen Luftfeuchtigkeiten 65 % und 70 % hierfür gewählt, als Abstände wurden 0 mm und 2,5 mm betrachtet. Durch die geringen Abstände soll ein optimierter Prozess abgebildet werden. Der Versuchsumfang beträgt damit $24 * 4 * 2 = 192$, der Freiheitsgrad je Faktor beträgt 1, der Freiheitsgrad des Fehlers beträgt $192 - 3 - 1 = 188$. Die Auswertung ist in Tabelle 5-11 dargestellt.

Tabelle 5-11 Varianzanalyse (MEA, RH = 65-70 %, Abstände 0 - 2,5 mm)

	f	SQ [μm^2]	V [μm^2]	F_A	SQ' [μm^2]	p [%]
a_{auf}	1	294531	340138	7,46	294531	3,07
a_{ab}	1	299819	345427	7,57	299819	3,12
Luftfeuchtigkeit	1	301620	347228	7,61	301620	3,14
F_2	188	8711074	45608		8711074	90,67
$F_{\text{krit},188,1,95\%} = 3,89, F_{\text{krit},188,1,99\%} = 6,77, F_{\text{krit},188,1,99,9\%} = 11,18$						

Die Faktoren Aufnahmehöhe, Ablagehöhe sowie Luftfeuchtigkeit sind damit im relevanten Untersuchungsraum signifikant. Deren Anteil ist in etwa gleich groß, jedoch dominiert die allgemeine Prozessstreuung.

Wird die Faktorstufe 5 mm für die Abstände mit in die Betrachtung aufgenommen, was einer nicht optimierten Ablage entspricht, so steigt der Einfluss der Luftfeuchtigkeit geringfügig mehr als der Einfluss der Abstände, siehe Tabelle 5-12. Sämtliche Faktoren zeigen einen hochsignifikanten Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit, die allgemeine Prozessstreuung dominiert.

Tabelle 5-12 Varianzanalyse (MEA, RH = 65-70 %, Abstände 0 - 2,5 – 5,0 mm)

	f	SQ [μm^2]	V [μm^2]	F_A	SQ' [μm^2]	p [%]
a_{auf}	2	1545953	772976	26,42	1487428	8,52
a_{ab}	2	1511647	755823	25,83	1453122	8,32
Luftfeuchtigkeit	1	1943579	1943579	66,42	1914317	10,96
F_2	426	12612082	29262		12612082	72,21
$F_{\text{krit},426,2,95\%} = 3,02, F_{\text{krit},426,2,99\%} = 4,66, F_{\text{krit},426,2,99,9\%} = 7,02$ $F_{\text{krit},426,1,95\%} = 3,86, F_{\text{krit},426,1,99\%} = 6,69, F_{\text{krit},188,1,99,9\%} = 10,98$						

Aus dieser Erkenntnis heraus ergeben sich direkt Rahmenbedingungen für den Prozess. Zum einen muss die Luftfeuchtigkeit präzise geregelt werden, zum anderen sind die Abstände während des Greifens und während des Ablegens einzuhalten. Bei unbekannter Ablageposition ist dies mit zusätzlicher Sensorik zu gewährleisten. Diese Erkenntnis deckt sich mit (Götz 1991, S. 89), in dem für geringstmögliche horizontale Toleranz möglichst geringe Abstände empfohlen werden.

Fazit: Bereitstellungsgenauigkeiten einer 7-Lagen-MEA

Wird die MEA geordnet bereitgestellt, so kann die Positionierung und Orientierung nur dann aufrechterhalten werden, wenn während des Greifens kein Abstand zwischen Bauteil und Greifer vorhanden ist. Dies impliziert, dass die Vakumerzeugung erst nach Kontakt mit dem Bauteil beginnen kann. Somit ist die notwendige Vorströmzeit Teil der eigentlichen Prozesszeit. Eine ausreichende Genauigkeit kann nur gewährleistet werden, wenn der Stapelprozess in kontrollierter Atmosphäre durchgeführt wird. Dabei ist entscheidend, dass die gleichen Bedingungen wie bei der MEA-Herstellung herrschen. Sind diese Bedingungen erfüllt, kann die MEA prozesssicher gehandhabt werden.

5.6 Bipolarplatte

Im Bauteilspektrum einer Brennstoffzelle stellt die Bipolarplatte das biegesteifste Bauteil dar. Nachfolgende Untersuchungen beschränken sich auf metallische Bipolarplatten, die sich, wie in Kapitel 2.4.1 dargestellt, aus Sicht der Handhabungstechnik, von graphitischen Bipolarplatten unterscheiden.

Für die Durchführung der Versuche wurde ein kommerzielles Bipolarplattendesign gewählt. Die Bipolarplatte besteht aus austenitischem Stahl (nach SAE 316L) in einer Materialstärke von 100 µm. Die äußeren Abmaße betragen 143 mm in der Breite und 447 mm in der Länge. Die Bipolarplatte ist umlaufend im Bereich der Dichtungsnut lasergeschweißt, weiterhin weist die Bipolarplatte Laserpunktenschweißungen im Bereich der aktiven Fläche auf („*Active Area Welding*“). Der sogenannte Knackfroscheffekt wird dadurch deutlich minimiert. Für die Versuche wurden ausschließlich beschichtete Bipolarplatten verwendet, die weiterhin eine Dichtung aufweisen. Ein Ausschnitt der Bipolarplatte inklusive der für die Auswertung aufgebrachten Referenzpunkte ist in Abbildung 5-16 dargestellt.

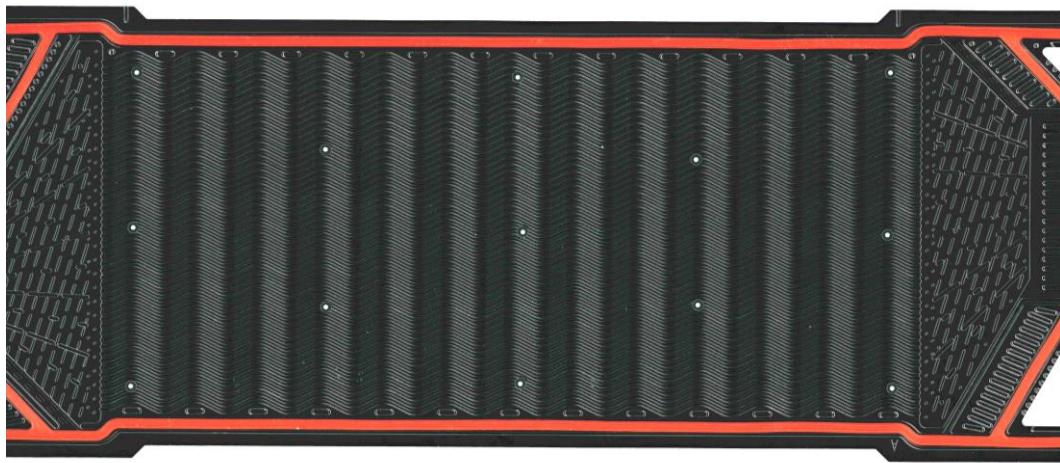


Abbildung 5-16 Verwendete Bipolarplatte mit Referenzmarkern

Analog zu den bereits untersuchten Bauteilen wurde die Versuchsdurchführung mit dem in Kapitel 5.1 gezeigten Versuchsaufbau und dazugehöriger Auswertung durchgeführt. Aufgrund des hohen Flächengewichts konnte ein Abstand von 2 mm als Obergrenze für ein Greifen ermittelt werden. Der vollständige Versuchsplan wurde daher mit den Abständen 0 mm, 1 mm und 2 mm sowohl in der Aufnahme als auch bei der Ablage durchgeführt. Der Versorgungsluftdruck betrug 3 bar. Damit war ein Greifen bereits mit einem deutlich geringeren Abstand als der in Abbildung 5-4 ermittelten Kennlinie möglich. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Bipolarplatte deutlich größer als die Messplatte der verwendeten Waage ist. Dadurch ergibt sich eine geringe Spaltbreite und letztlich ein größerer Einfluss des dynamischen Unterdrucks (vgl. Götz 1991, S. 80).

Die Ergebnisse in Form von Zielscheibendiagrammen des vollständigen Versuchsplans sind in Abbildung 5-17 dargestellt. Eine statistische Auswertung der Versuche erfolgt in Tabelle 5-13 sowie in Tabelle 5-14 in Form einer Varianzanalyse.

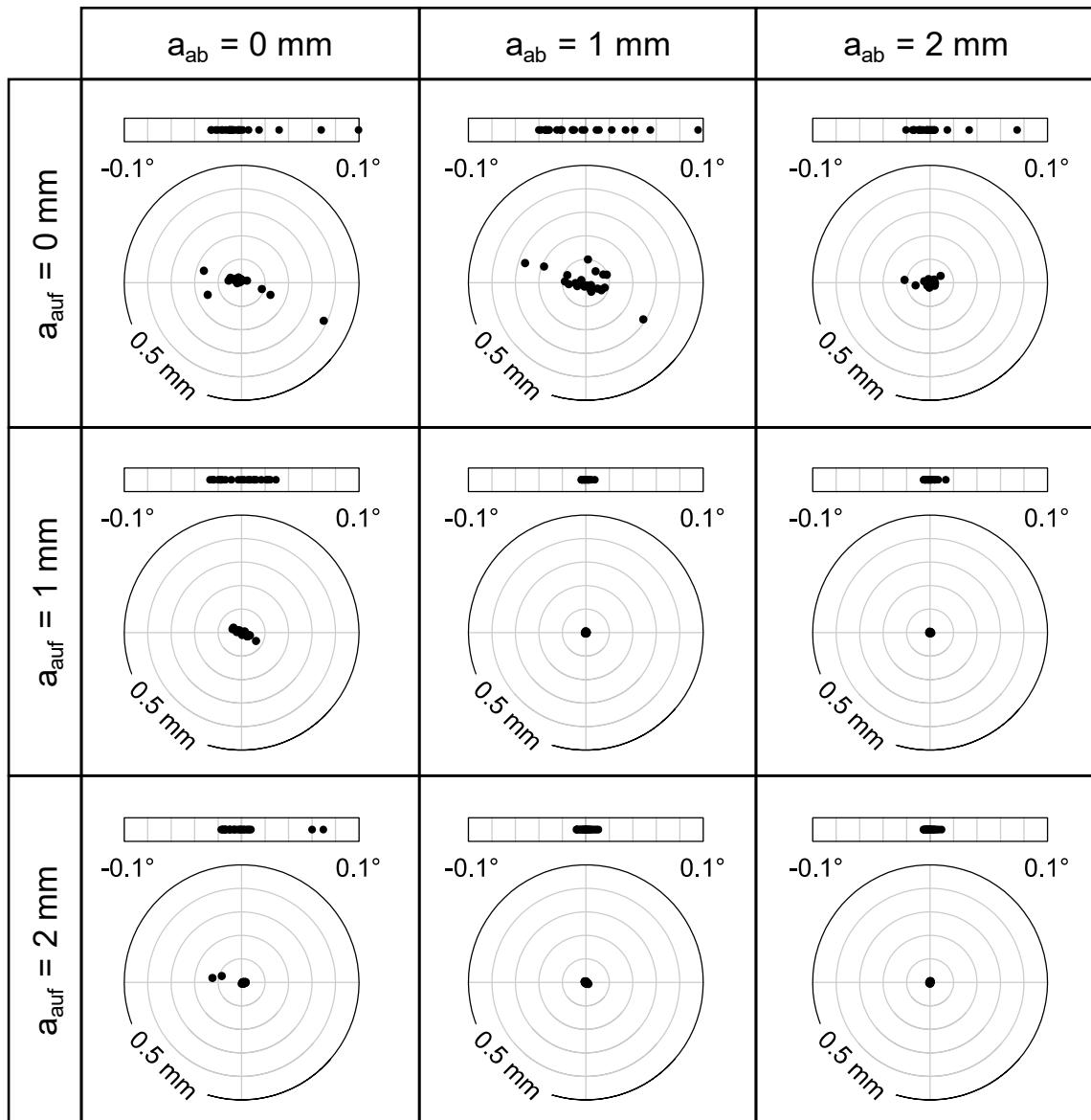


Abbildung 5-17 Positionsabweichungen bei mehrmaligem Greifen einer BPP

Das Verhalten der verwendeten Bipolarplatte unterscheidet sich deutlich von dem Verhalten der zuvor untersuchten MEA. Niedrige Abstände beim Aufnehmen und Ablegen der Bipolarplatte führen zu hohen Positionsabweichungen, wohingegen größtmögliche Abstände zu einer wiederholgenauen Positionierung der Bipolarplatte führen.

Tabelle 5-13 Statistische Auswertung der Ablagegenauigkeit (BPP)

a_{auf} [mm]	a_{ab} [mm]		min [µm]	max [µm]	σ [µm]	σ_{abs} [µm]	$C_{p(\text{abs})}$ [-]
0,0	0,0	x	- 160,8	349,7	89,9	81,4	0.41
		y	- 161,8	51,1	39,2		
0,0	1,0	x	- 258,8	244,7	93,1	71,4	0.47
		y	- 155,7	99,2	48,2		
0,0	2,0	x	- 108,8	44,9	29,6	22,0	1.52
		y	- 20,8	29,2	11,0		
1,0	0,0	x	- 38,7	61,3	23,2	14,7	2.27
		y	- 35,6	20,9	12,0		
1,0	1,0	x	- 4,0	3,7	2,1	1,3	25.14
		y	- 3,7	5,4	2,2		
1,0	2,0	x	- 3,4	5,3	2,1	1,0	32.04
		y	- 2,8	3,9	1,6		
2,0	0,0	x	- 124,0	17,3	31,6	27,2	1.23
		y	- 6,3	27,1	7,1		
2,0	1,0	x	- 4,6	10,9	3,7	2,4	13.99
		y	- 6,5	4,3	3,1		
2,0	2,0	x	- 3,3	2,1	1,4	1,5	22.31
		y	- 5,1	5,7	2,4		

Anhand der Daten wurde eine Varianzanalyse durchgeführt, um die Einflüsse detaillierter bewerten zu können, die Ergebnisse sind in Tabelle 5-14 dargestellt. Für die Messwerte wurden die Quadratsummen (SQ), die Varianzen (V), F-Werte sowie absolute Streuungsanteile (SQ') und deren relative Anteile p berechnet. Sowohl Aufnahme- als auch Ablagehöhe haben jeweils drei Faktorstufen (0 mm, 1 mm, 2 mm) und damit jeweils zwei Freiheitsgrade $f_{a,\text{auf}} = f_{a,\text{ab}} = 2$. In Summe wurden $25 * 9 = 225$ Wiederholungen durchgeführt, somit beträgt der Freiheitsgrad $f_{F2} = 225 - 2 - 2 - 1 = 220$. Sowohl das Greifen als auch das Ablegen haben hochsignifikanten Einfluss, wobei der Anteil des Aufnehmens größer ist (35,5 % zu 23,3 %). Der Streuungsfehler beträgt etwa 40 % der Gesamtstreuungen. Der Anteil des Streuungsfehlers ist damit zu erklären, dass sich die Messwerte zum Teil nahe der Auflösung des Messmittels bewegen.

Tabelle 5-14 Varianzanalyse der Greifabstände (BPP)

	f	SQ [μm^2]	V [μm^2]	F_A	SQ' [μm^2]	p [%]
a_{auf}	2	208773	104387	97,7	206635	35,5
a_{ab}	2	138019	69010	64,6	135881	23,3
F_2	220	235180	1069	-	239456	41,1
$F_{\text{krit},220,2,95\%} = 3,04, F_{\text{krit},220,2,99\%} = 4,70, F_{\text{krit},220,2,99,9\%} = 7,13$						

Es kann vermutet werden, dass die Ablagegenauigkeit der Bipolarplatte in Zusammenhang mit dem Knackfrosch steht. Beim Greifen oder Ablegen kommt es zu einer Deformation der Platte. In der Folge ändert sich aber auch die laterale Position. Um diese These weiterzuführen, wurden die ermittelten z-Koordinaten der Punkte während der Versuche tiefergehend analysiert. Dazu wurde je Messpunkt und Versuchsreihe die Standardabweichung in z-Richtung ermittelt. Entsprechend zu der in Abbildung 5-16 dargestellten Anordnung der Messpunkte wurde die Abweichung in der Mitte des Bauteils in Form einer Einfärbung des Hexagons um den Messpunkt dargestellt (Abbildung 5-18).

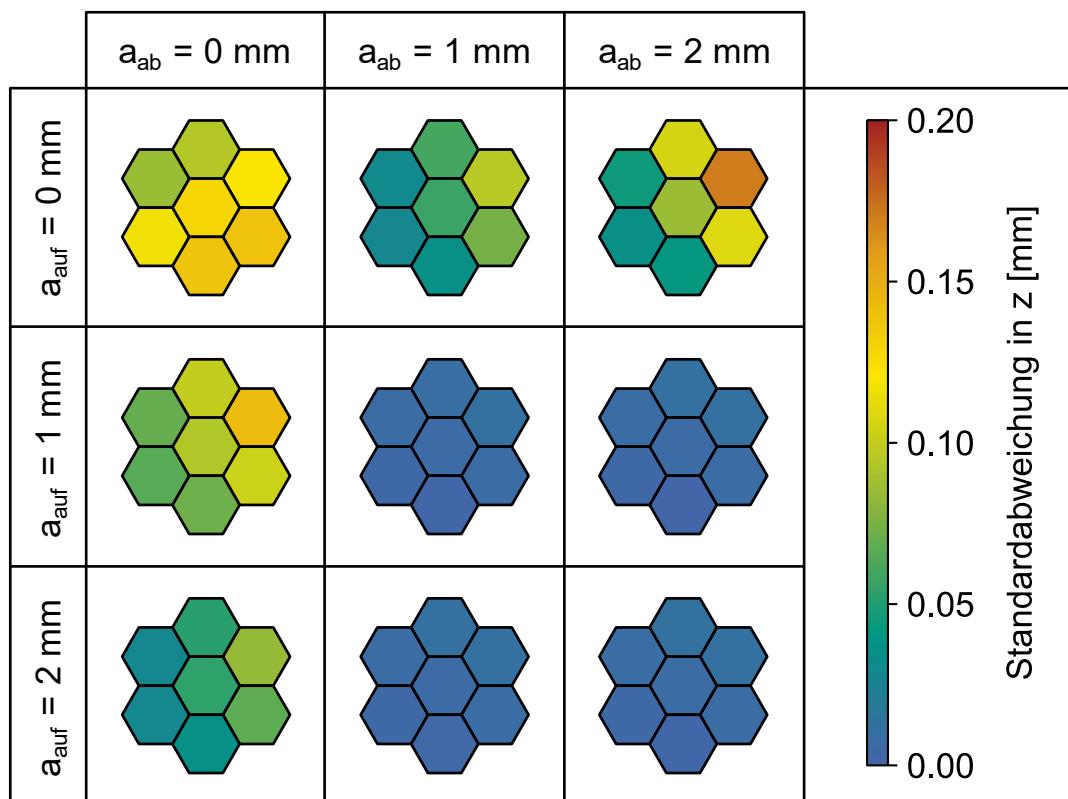


Abbildung 5-18 Standardabweichung der z-Lage einer BPP

Zwischen der Standardabweichung der z-Koordinate sowie der Positioniergenauigkeit ist eine Korrelation zu erkennen. Ein Nullabstand sowohl beim Greifen als auch beim

Ablegen führt zu einer Formänderung der Bipolarplatte. In der Folge kommt es zu einer Lageabweichung.

Erklärungsmodell zum Einfluss der Abstände: Zur Erläuterung soll auf das in Abbildung 5-8 entworfene Modell (II) zurückgegriffen werden. Bei metallischen Bipolarplatten ist eine leichte Verformung sowie ein entstehender Knackfrosch nahezu unvermeidbar. Die Kraft, die beim Anfahren erzeugt wird, ist dabei groß genug, um eine elastische Verformung der Bipolarplatte herbeizuführen. In der Folge kommt es zu stochastischer Abweichung der Position. Gleichzeitig ist die Bipolarplatte aber steif genug und der Unterdruck gering genug, um während des Greifens eine Verformung zu vermeiden.

Das gezeigte Verhalten soll weiter untersucht werden. Mit einem Auf- und Ablageabstand von 0 mm sowie von 1 mm wurden die Versuche an zehn gleichen Bipolarplatten einer Charge wiederholt. Wie zuvor wurde bei 25-facher Wiederholung die relative Positionsänderung zwischen den Wiederholungen untersucht. Mit der anschließenden Auswertung soll die Frage beantwortet werden, ob es durch Produktschwankungen einen signifikanten Einfluss auf die erzielbaren Genauigkeiten gibt. Die Versuche wurden daher einer Varianzanalyse unterzogen. Bei $n = 10$ Bipolarplatten mit $m = 24$ Messungen gibt es $f_z = 10 - 1$ Freiheitsgrade zwischen den Messgrößen und $f_i = n * m - 1 - f_z = 230$ Freiheitsgrade innerhalb der Gesamtstichprobe. Für die Messwerte wurden die Quadratsummen (SQ), die Varianzen (V), F-Werte sowie absolute Streuungsanteile (SQ') und deren relativen Anteil p berechnet (Tabelle 5-16, Tabelle 5-15). Die dazugehörigen kritischen F-Werte sind der Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 5-15 Varianzanalyse versch. BPP, kein Abstand

	f	SQ [µm²]	V [µm²]	F_A	SQ' [µm²]	p [%]
Produkt	9	8085	898,3	1,55	2881	2,0
F ₂	230	132984	578,2		138188	98,0

Tabelle 5-16 Varianzanalyse versch. BPP, 1 mm Abstand

	f	SQ [μm^2]	V [μm^2]	F _A	SQ' [μm^2]	p [%]
Produkt	9	720,1	80,0	7,56	624,9	19,8
F ₂	230	2433,3	10,6		2528,5	80,2

$F_{\text{krit},230,9,95\%} = 1,92$, $F_{\text{krit},230,9,99\%} = 2,49$, $F_{\text{krit},230,9,99,9\%} = 3,24$

Die statistische Analyse zeigt, dass bei keinem Nullabstand (Tabelle 5-15) die Gesamtstreuung dominiert und kein signifikanter Einfluss des einzelnen Produktes gegeben ist. Die Betrachtung eines Einzelproduktes kann damit als repräsentativ angesehen werden.

Bei einem Abstand von 1 mm hingegen (Tabelle 5-16) ist die Gesamtstreuung, wie bereits zuvor dargestellt, geringer. Die Positionsabweichungen werden durch Produktschwankungen hochsignifikant beeinflusst, allerdings dominiert die Streuung innerhalb einer Gruppe mit etwa 80 %. Dies beinhaltet sämtliche übrigen Abweichungen, die nicht auf Produktschwankungen zurückzuführen sind, insbesondere auch Messfehler sowie unvermeidbare geringfügige Positionsabweichungen durch das Greifen. Erreichbare Genauigkeiten stehen somit in direktem Zusammenhang zu den Produkteigenschaften.

Einschränkend bleibt zu erwähnen, dass derartige Untersuchungen ausschließlich für ein einzelnes Design einer Bipolarplatte und deren Herstellung Gültigkeit hat. Weiterhin stellt dies für den eigentlichen Stapelprozess nur eine Eingangsgröße dar. Die durchgeführte Untersuchung kann daher vor allem dazu dienen, um die Fähigkeit der Vorprozesse der Bipolarplattenherstellung bewerten zu können.

Zusammenfassung: Bedingt durch die Prozesskette der Herstellung einer metallischen Bipolarplatte aus Umformen, Schweißen und Beschichten kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Bipolarplatte hinreichend genau bereitgestellt wird. Aus diesem Grund ist eine erneute Ausrichtung notwendig. Die Genauigkeit des Handhabungsvorgangs lässt sich steigern, sofern beim Greifen ein Abstand zwischen Bipolarplatte und Greifer herrscht und damit einwirkende Kräfte möglichst minimiert werden. Während der Handhabung selbst sind nur geringe Positionsabweichung zu erwarten.

5.7 Bewertung

In diesem Kapitel wurde zunächst ein Versuchsaufbau vorgestellt, mit dem Einflussfaktoren auf Handhabungsvorgänge flächiger Bauteile untersucht werden können. Die anschließenden Versuche mit teils hohen Wiederholgenauigkeiten haben gezeigt, dass der Versuchsstand hierfür fähig ist.

Abweichungen mit anderen Materialien oder anderer Parametrierung haben darüber hinaus aber ebenfalls gezeigt, dass es zu Ungenauigkeiten kommen kann, deren Begründung nicht in der Maschinentechnik, sondern in der Wechselwirkung zwischen Material und Greifer liegt.

In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die bereits in (Götz 1991) dargestellten Eigenschaften eines Niederdruckflächengreifers zwingend mit den verwendeten Bauteilen qualifiziert werden müssen. Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Ebene, biegesteifere Bauteile wie die GDL lassen sich präzise greifen und ablegen. Aufgrund geringer Flächengewichte empfiehlt sich die Verwendung eines möglichst geringen Abstandes und gegebenenfalls eines Vakuumtischs.
- Dünne und äußerst biegeschlaffe Bauteile wie die CCM lassen sich ausschließlich ohne Abstand und mit einem flächigen Vakuumtisch prozesssicher greifen. Die Möglichkeit zur Verwendung eines Vakuumtischs ist in der Brennstoffzelle gegeben, da der Subgasket an dieser Stelle funktionsbedingt eine Aussparung aufweist. Ist bereits eine GDL montiert, stellt dies ebenfalls keine Herausforderung dar, da diese luftdurchlässig ist und sich damit dennoch die Funktion eines Vakuumtischs erfüllen lässt.
- Biegesteife aber in der Form instabile Bauteile wie die Bipolarplatte können mit hoher Genauigkeit gestapelt werden, wenn beim Greifen ein Abstand eingehalten wird und einwirkende Kräfte minimiert werden. Bedingt durch höhere Flächengewichte ist ein Abstand während der Bauteilablage keine Störgröße. Die Verwendung eines Vakuumtischs ist nicht erforderlich.

Die Erkenntnisse führen ebenfalls zu der Erkenntnis, dass die Bauteilentwicklung und die Entwicklung der entsprechenden Produktionstechnik eng verzahnt sein müssen. Die hier vorgestellten Versuche erlauben dabei bereits frühzeitig im Prototypenstadium Aussagen hinsichtlich der Prozessfähigkeit zu treffen.

6 Umsetzung eines sensorischen Greifers

Vorherige Untersuchungen beschränkten sich auf die Handhabbarkeit der Materialien beim Greifen und Ablegen (Vgl. Abbildung 4-2, blau markierte Funktionsbausteine). Somit kann beschrieben werden, mit welcher Unsicherheit ein Handhabungsvorgang behaftet ist.

Nicht untersucht wurde hingegen, wie sich die Bauteile ausrichten lassen. Bereits in den zuvor durchgeführten Analysen (vgl. Kapitel 4.3.2) konnte gezeigt werden, dass es vorteilhaft ist, wenn die Ausrichtung anhand von Funktionsmerkmalen erfolgt. CCM und MEA haben als flächig homogene Bauteile keine Funktionsmerkmale.

Im vorherigen Kapitel wurden erwartete Positionierunsicherheiten für CCM, GDL und MEA quantifiziert. Erfolgt der Greifvorgang direkt nach der Konfektionierung, kann von einer präzisen Assemblierung ausgegangen werden (vgl. Götz 1991, S. 121f). Weiterhin wurden in Abschnitt 2.6.2 keine funktionskritischen Fehler in der Bauteilausrichtung identifiziert. Es wird daher empfohlen Produktionsanlagen zur MEA-Herstellung mit dem anschließenden Stacking zu koppeln. Es muss keine erneute Ausrichtung der MEA vorgenommen werden, weiterhin ist sichergestellt, dass sich keine Abweichungen in der Luftfeuchtigkeit ergeben.

Folgende Untersuchungen beschränken sich daher auf die Bipolarplatte. Der vorherige Prozessschritt ist dabei der Dichtungsauftrag oder das Laserschweißen mit gegebenenfalls erfolgendem Waschen (vgl. Abbildung 2-5). Es kann nicht von einer ausreichenden Bereitstellungsgenauigkeit ausgegangen werden. Aufgrund unterschiedlicher Produktionsumgebungen und Anforderungen an die technische Sauberkeit ist eine direkte Kopplung der Bipolarplattenherstellung an das Stacking darüber hinaus nicht sinnvoll.

Es wurde bereits motiviert, dass die Kante der Bipolarplatte zur Ausrichtung ungeeignet ist. Weiterhin wurde motiviert, dass eine Integration der Funktion „Position und Orientierung erfassen“ in den Greifer Genauigkeits- und Taktzeitvorteile mit sich bringen kann (vgl. Abbildung 4-5). Hierzu soll der in Kapitel 5 (s. Abbildung 5-1) verwendete Greifer konstruktiv angepasst werden.

6.1 Modifizierter Greifer mit integrierter Bilderfassung

Abbildung 6-1 zeigt die Schnittdarstellung des Greifers. Ausgangspunkt ist der zuvor verwendete Flächengreifer (vgl. Abbildung 5-1). Um die Funktion der Positions-

erfassung zu integrieren, wurde ein Teil der Greiffläche ausgespart. Die Aussparung soll dazu dienen, eine ideale Betrachtung des Bauteils zu ermöglichen. Dazu wurde die Rückseite durch eine transparente Platte (a) ersetzt. Um möglichst hohe Steifigkeiten zu erzielen, ist diese ausschließlich als Zwischenlage verbaut. Die Krafteinleitung erfolgt über eine Aluminiumplatte (b). Weiterhin gewährleistet die Aluminiumplatte durch die erzeugte Abdunkelung, dass es zu keinen Störeinflüssen durch die Umgebung kommt.

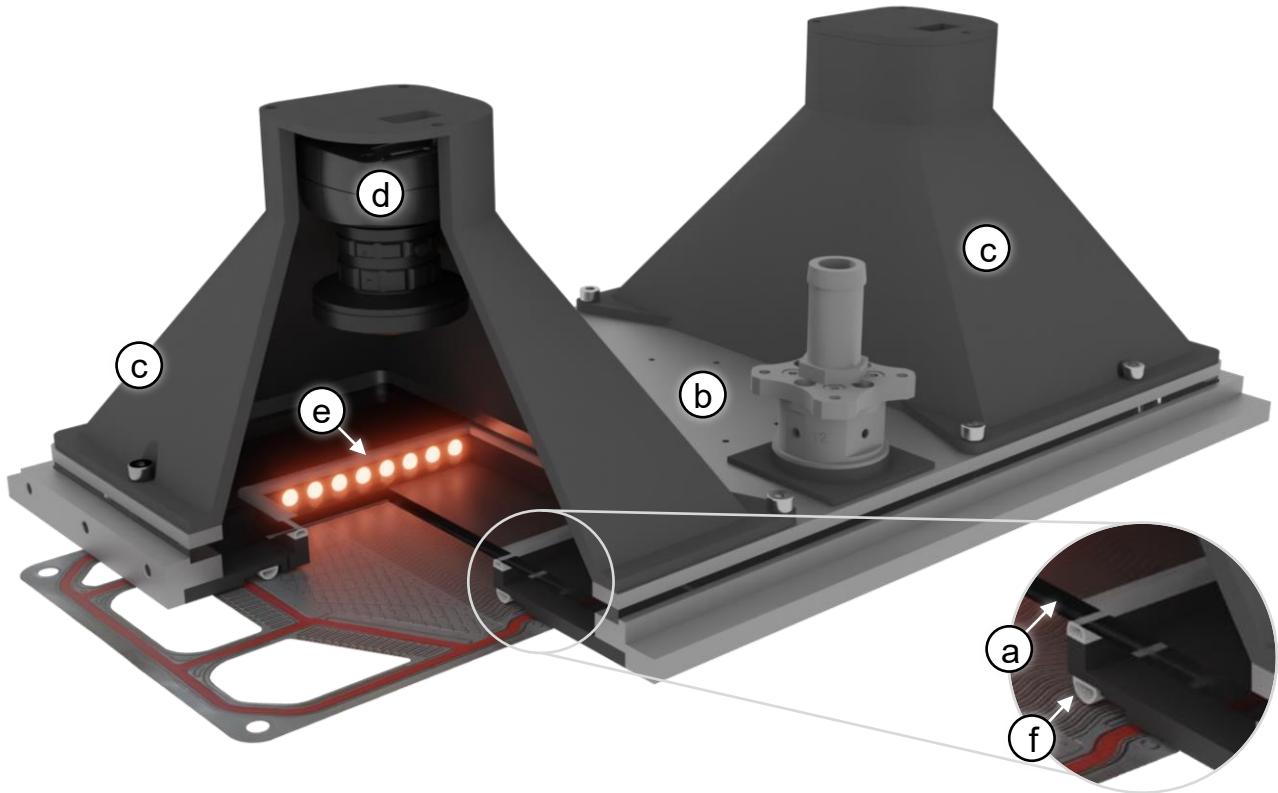


Abbildung 6-1 Schnittdarstellung des Greifers

Essenziell bei der Nutzung eines optischen Systems ist die weitere Reduktion von Störeinflüssen, also die Herstellung eines möglichst gleichbleibenden Beleuchtungszustandes. Hierzu wurden durch zwei zusätzliche Kameraschirme (c) Störeinflüsse von außen vollständig eliminiert. Dem kommt für den vorgesehenen Einsatzzweck besondere Relevanz zu, da die auf die Bipolarplatte aufgebrachte Beschichtung glänzend sein kann (vgl. Abschnitt 2.4.1). Die Kameraschirme dienen gleichzeitig zur Befestigung der Kamera (d). Während des Greifens kommt es somit zu keinem Lichteinfall auf den zu inspizierenden Bereich der Bipolarplatte. Dies ermöglicht gezielt einen gewünschten Beleuchtungszustand herzustellen. Für die Auswertung soll

insbesondere das Flowfield einer Bipolarplatte verwendet werden. Eine Dunkelfeldbeleuchtung (e) ermöglicht dabei das Hervorheben von Konturen in Tiefenrichtung, wie es in diesem Anwendungsfall erforderlich ist. Für jedes der beiden verwendeten Sichtfenster wurden daher seitlich acht LEDs integriert.

Bedingt durch die integrierten Sichtfenster wurde die effektive Greiffläche der Bipolarplatte reduziert. In Greifversuchen konnte ermittelt werden, dass die erzeugte Kraft dennoch ausreichend ist. Sind die Bipolarplatten durch die Vorprozesse allerdings geringfügig deformiert, so kann ein erfolgreicher Greifvorgang nicht stets gewährleistet werden. Um die Prozesssicherheit wiederherzustellen, wurden daher Dichtlippen (f) am Greifer angebracht. Diese Dichtlippen ermöglichen einen besseren Abschluss zwischen Greiffläche und Flowfield. Die Dichtlippen befinden sich umlaufend am Rand und sind in einer Nut befestigt, so dass diese nur eine geringe Kraft auf das Bauteil ausüben.

Kameraeinheit

Es wurden zwei Kameras des Herstellers IDS Imaging verwendet. Die technischen Daten sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Tabelle 6-1 Technische Spezifikation der verwendeten Kamera

Bezeichnung	UI-3240LE-M-GL
Sensortyp	CMOS, monochrom
Auflösung	1280 x 1024
Shutter	Global Shutter
Sensorgröße (Höhe)	5,427 mm
Sensorgröße (Breite)	6,784 mm
Pixelgröße (a_{cam})	5,3 μ m

Die Kamera weist eine hohe Lichtempfindlichkeit auf. Die Kamera sollte möglichst nahe an dem Messobjekt, der Bipolarplatte, angebracht werden können, damit der Greifer möglichst kompakt aufgebaut werden kann. Aus diesem Grund wurde ein Objektiv mit geringer Brennweite des Herstellers Edmund Optics (Techspec C-Series, #89-410) verwendet. Technische Spezifikationen des Objektivs sind Tabelle 6-2 zu entnehmen.

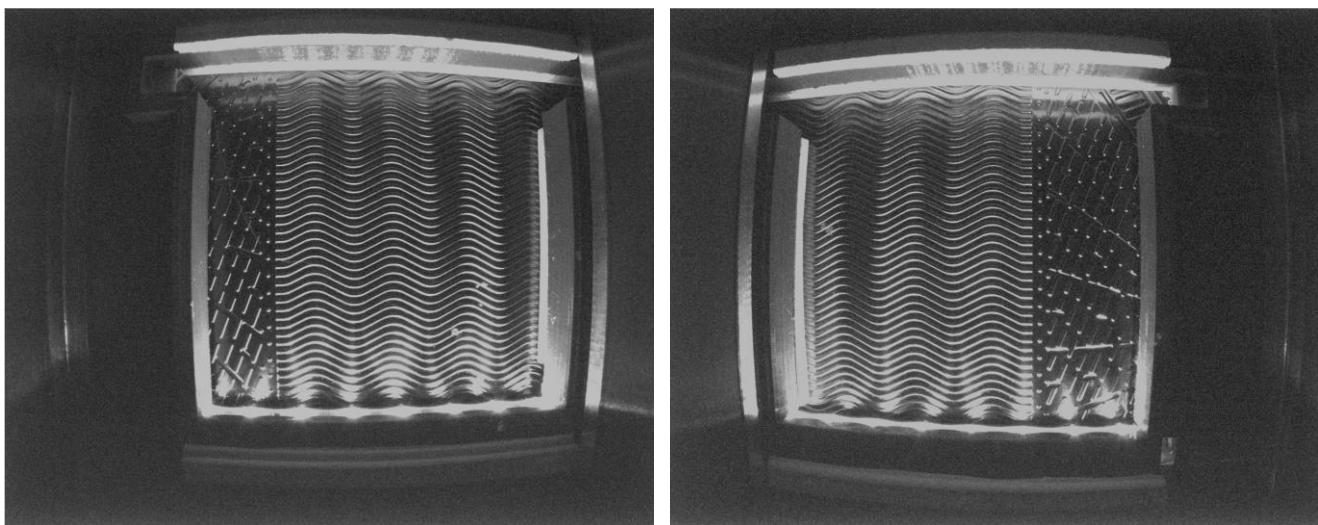
Tabelle 6-2 Technische Spezifikation des verwendeten Objektivs

Bezeichnung	Techspec C-Series #89-410
Brennweite (f)	3,5 mm
Bildwinkel (horizontal)	102,4°
Bildwinkel (vertikal)	82,3°
Fokus	Manuell
Numerische Apertur	0,0572

Der Arbeitsabstand d der Kamera beträgt ca. 85 mm. Somit ergibt sich gemäß Formel 6-1 eine Auflösungsgenauigkeit von etwa 129 μm .

$$a_{obj} = a_{cam} * \frac{d}{f} = 5,3 \mu\text{m} * \frac{85 \text{ mm}}{3,5 \text{ mm}} \approx 129 \mu\text{m} \quad \text{Formel 6-1}$$

Die Auflösungsgenauigkeit liegt somit in derselben Größenordnung wie die angestrebte Ablagegenauigkeit von 0,1 mm. Um als Messmittel eingesetzt werden zu können, wird angestrebt, dass die Genauigkeit des Messmittels um eine Größenordnung höher ist als die des zu messenden Wertes. Die Genauigkeit ließe sich zwar durch eine höhere Auflösung erhöhen, verkleinerte Pixel führen allerdings zu geringerer Lichtempfindlichkeit und einem erhöhten Rauschen. Eine Erhöhung der Auflösung unter Beibehaltung der Pixelgröße hätte die gleiche Lichtempfindlichkeit zur Folge. Durch den damit größeren Sensor wäre die Optik allerdings ebenfalls größer und schwerer. Es soll daher durch geeignete Bildauswertung ein Messergebnis im Subpixel-Bereich erzielt werden.

*Abbildung 6-2 Kamerabilder ohne Vorverarbeitung*

Bedingt durch den Weitwinkel der Kamera und die kurze Bauform kommt es zu starken Verzerrungen des Bildes, wie in Abbildung 6-2 zu erkennen. Aus diesem Grund wurden die beiden Kameraobjektive jeweils durch ein Schachbrettmuster kalibriert. Nach der Kalibrierung werden die Bilder so zugeschnitten, dass ausschließlich das Bauteil und nicht der Greifer auf den Bildern zu sehen sind. Darüber hinaus wird keine weitere Vorverarbeitung vorgenommen. Eine Überlagerung der für die Auswertung verwendeten Bildausschnitte sowie der gesamten Bipolarplatte ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Bereiche, die sich nahe an der Beleuchtung befinden, sind teilweise überbelichtet und besitzen daher keinen Informationsgehalt. Entsprechende Bereiche wurden zugeschnitten, die im weiteren Verlauf auszuwertenden Bereiche sind daher nicht auf die Mittellinie des Bauteils zentriert.

Bestimmung des Arbeitsabstandes

Zur Bestimmung des Arbeitsabstandes wurden die bereits zuvor verwendeten Referenzmarker mit Hilfe des Messsystems GOM Atos Q in ihrer Position auf einer Platte bestimmt. Im Anschluss daran wurde die Platte mit dem Greifer gegriffen und für die beiden Kameras wurde eine Aufnahme angefertigt. Die Aufnahmen wurden zunächst mit den bereits ermittelten Korrekturparametern entzerrt. Die Lage der Referenzmarker wurde mittels der Hough-Methode in Bildkoordinaten erkannt.

Durch Verwendung eines solve-PnP Algorithmus wurden die mittels GOM Atos Q vermessenen Objektpunkte mit den Bildkoordinaten verglichen, um damit die Kamerakoordinaten in einem gemeinsamen Koordinatensystem zu ermitteln. Um Messungen zu ermöglichen, sind insbesondere die z-Abstände (Arbeitsabstand) sowie der Abstand der Kameras zueinander (d_{cam}) relevant. Es wurde der Abstand zwischen den Bildmittelpunkten der Kameras nach Entzerrung und Zuschnitt verwendet, siehe Abbildung 6-3. Die Position der Kameras selbst ist weiteren Montageabweichungen unterworfen. Wie in Abbildung 6-3 ersichtlich sind die Bilder der rechten und linken Kamera durch den Zuschnitt nicht exakt mittig. Die Sichtfenster des Greifers wurden 3D-vermessen. In den entzerrten aber unbeschnittenen Bildern wurde ebenfalls das Sichtfenster ermittelt, woraus letztlich die Mittelposition der Bildausschnitte bezogen auf den Greifer bestimmt werden konnte. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 6-3 vermerkt.

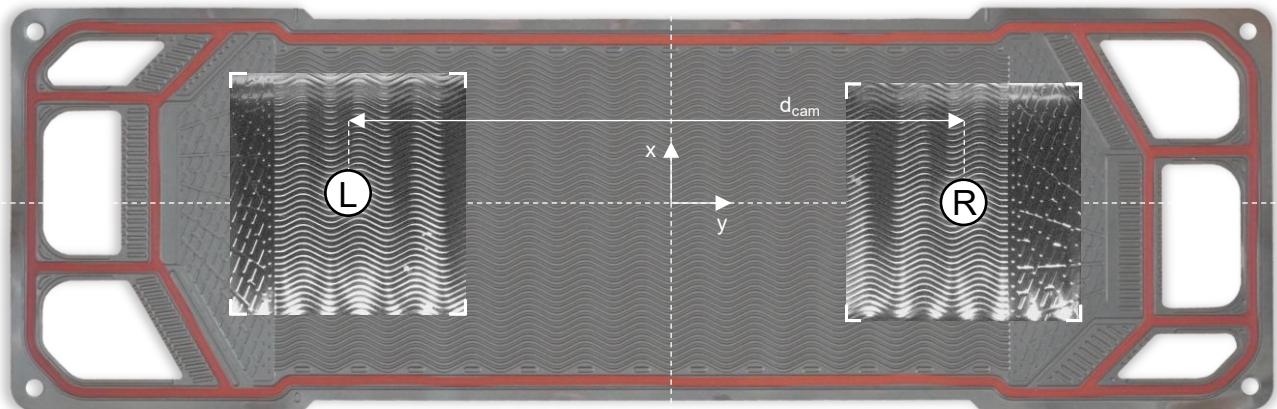


Abbildung 6-3 Bipolarplatte, überlagert mit zugeordnetem Kamerabild

Tabelle 6-3 ermittelte geometrische Werte der Kameras

Parameter	L	R
Pixelgröße	130,0 μm	131,1 μm
Arbeitsabstand	85,84 mm	86,58 mm
Entfernung LR (x)		6,82 mm
Entfernung LR (y)		224,72 mm

6.2 Versuchsaufbau

Zur Qualifizierung unterschiedlicher Auswerteverfahren wurde die Bipolarplatte gegriffen und deren Position von der Vorderseite mit dem bereits in vorangegangenen Versuchen verwendeten Messsystem (GOM Atos Q) vermessen. Es wurden 250 Bilder inklusive deren gemessene Verschiebung erfasst. Die Bipolarplatte wurde dabei zwischen den Aufnahmen manuell verschoben. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6-4 dargestellt.

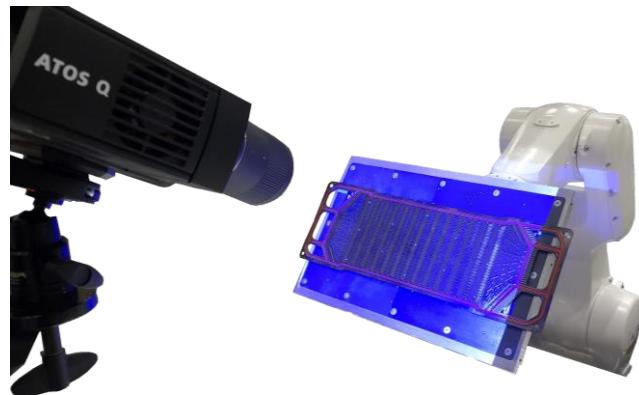


Abbildung 6-4 Versuchsaufbau zur Qualifizierung des Auswertealgorithmus

Anhand eines Vergleichs von Messdaten und ermittelten Daten wurde eine lineare Korrektur der Messwerte vorgenommen (β_{corr} , x_{corr1} , y_{corr1}). Der Schwerpunkt der Messpunkte des Referenzmesssystems ist nicht deckungsgleich mit dem Bauteilmittelpunkt. Durch Vorversuche wurde die Verschiebung anhand eines Vergleichs der Daten angenähert und Korrekturwerte bestimmt (x_{corr2} , y_{corr2}). Die ermittelten Werte sind Tabelle 6-4 zu entnehmen. Fehler durch Montageabweichungen betragen weniger als 2 %.

Tabelle 6-4 Korrekturparameter zur Positionsbestimmung

Parameter	Wert	Erläuterung
d_{cam}	214,32 mm	Gemessener Abstand der Kameramittelpunkte
β_{corr}	1,0036	
x_{corr1}	1,0187	Lineare Korrekturfaktoren
y_{corr1}	1,0166	
x_{corr2}	2,082 mm	Differenz zwischen Messpunktmittelpunkt und
y_{corr2}	15,206 mm	Bauteilmittelpunkt

Mit den zu untersuchenden Verfahren soll die Verschiebung zwischen dem n-ten Bild ($x_{A,n}, y_{A,n}$) und dem ersten Bild ($x_{A,0}, y_{A,0}$) bestimmt werden. Die mittels Kamera A observierte Verschiebung ($x_{A,n}, y_{A,n}$) wird zunächst unabhängig von der durch Kamera B observierten Verschiebung ($x_{B,n}, y_{B,n}$) bestimmt. Aus den Einzelverschiebungen in x-Richtung und y-Richtung wird zunächst die Rotation bestimmt (Formel 6-2). Mit der ermittelten Rotation wird anschließend für Kamera L und R ermittelt, welcher Verschiebung ($x_{L,n,m}, y_{L,n,m}$) bzw. ($x_{R,n,m}, y_{R,n,m}$) um die Greifermitte dies entspricht (Formel 6-3). Die abschließende Verschiebung (x, y) wird durch Mittelwertbildung unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren bestimmt (Formel 6-4).

$$\beta = \arctan \left(\frac{x_{L,n} - x_{R,n}}{y_{L,n} - y_{R,n}} * \frac{1}{d_{cam}} \right) * \beta_{corr} \quad \text{Formel 6-2}$$

$$\begin{aligned} x_{L,n,m} &= x_{L,n} + \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta)} * \frac{d_{cam}}{2} \\ y_{L,n,m} &= y_{L,n} - \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta)} * \frac{d_{cam}}{2} \end{aligned} \quad \text{Formel 6-3}$$

$$\begin{aligned} x_{R,n,m} &= x_{R,n} - \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta)} * \frac{d_{cam}}{2} \\ y_{R,n,m} &= y_{R,n} + \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta)} * \frac{d_{cam}}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} * \left(\frac{x_{L,n,m} + x_{R,n,m}}{y_{L,n,m} + y_{R,n,m}} \right) * \left(\frac{x_{corr1}}{y_{corr1}} \right) + \left(\frac{x_{corr2}}{y_{corr2}} \right) * \tan(\beta) \\ y &= \frac{1}{2} * \left(\frac{y_{L,n,m} + y_{R,n,m}}{x_{L,n,m} + x_{R,n,m}} \right) * \left(\frac{y_{corr1}}{x_{corr1}} \right) + \left(\frac{y_{corr2}}{x_{corr2}} \right) * \tan(\beta) \end{aligned} \quad \text{Formel 6-4}$$

Mit dem erzeugten Datensatz sollen im weiteren Verlauf offline verschiedene Verfahren qualifiziert werden. In Kapitel 4.3.2 wurde eine Vorauswahl für die zu untersuchenden Auswertemethoden getroffen:

- Phase Cross Correlation (Korrelationsmethode)
- Template Matching (Korrelationsmethode)
- Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) (Merkmalsmethode)

Die wesentlichen Schritte der Korrelationsmethode sollen nachfolgend kurz anhand des Anwendungsfalls beschrieben werden. In Abbildung 6-5 sind die Schritte der Phase Cross Correlation beginnend mit den entzerrten Ausgangsbildern dargestellt. Zunächst wird jedes der Ausgangsbilder (Formel 6-5, (1) sowie Abbildung 6-6, oben) einer mehrdimensionalen, diskreten Fourier-Transformation unterzogen (Formel 6-5, (2) sowie die betragsmäßige Darstellung in Abbildung 6-6, mittig). Es resultieren die komplexen, zweidimensionalen Matrizen $f1$, $f2$. Das Kreuzleistungsspektrum $K_{n,m}$ wird anschließend durch Matrixmultiplikation der konjugierten Matrix $f1$ mit der Matrix $f2$ bestimmt (Formel 6-5, 3). Durch Rücktransformation von $K_{n,m}$ berechnet sich anschließend der zweidimensionale Kreuzkorrelationskoeffizient (Formel 6-5, (4), sowie Abbildung 6-6, unten links). Der Kreuzkorrelationskoeffizient lässt sich dabei so interpretieren, dass ein höherer Wert, demnach in der Darstellung eine höhere Helligkeit, einer größeren Übereinstimmung entspricht. Dementsprechend entspricht der Index des Maximums der Verschiebung zwischen den beiden Bildern (Formel 6-5, (5) sowie Abbildung 6-6, unten).

Zur Bestimmung der Verschiebung ist das Bild in Quadranten zu unterteilen. Befindet sich das Maximum im 2. Quadranten (links oben), so entspricht dies einer positiven Verschiebung um die Koordinaten des Maximalwertes in x- und y-Richtung. Befindet sich das Maximum hingegen im 1. Quadranten (rechts oben), so ist die Verschiebung in y-Richtung negativ. Der Betrag der Verschiebung lässt sich durch Messung des Abstandes zum rechten Bildrand bestimmen. Analog dazu können negative x-Verschiebungen bestimmt werden, wenn sich das Maximum im 3. Quadranten befindet. Im 4. Quadranten ist die Verschiebung in beide Richtungen negativ, deren Betrag auch hier durch die Entfernung zum Bildrand gegeben ist.

$$(1) \quad imgA_{n,m} = \begin{bmatrix} img1_{0,0} & \cdots & img1_{0,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ img1_{N,0} & \cdots & img1_{N,M} \end{bmatrix}, imgB_{n,m} = \cdots \quad Formel\ 6-5$$

(2) mit $f1, f2$ als DFT von $imgA, imgB$

(3) $K_{n,m} = \overline{f1} * f2$ (Kreuzleistungsspektrum)

(4) mit $IK_{n,m}$ als Rücktransformation von $K_{n,m}$

(5) $d = \text{argmax}(\{IK_{n,m}\})$

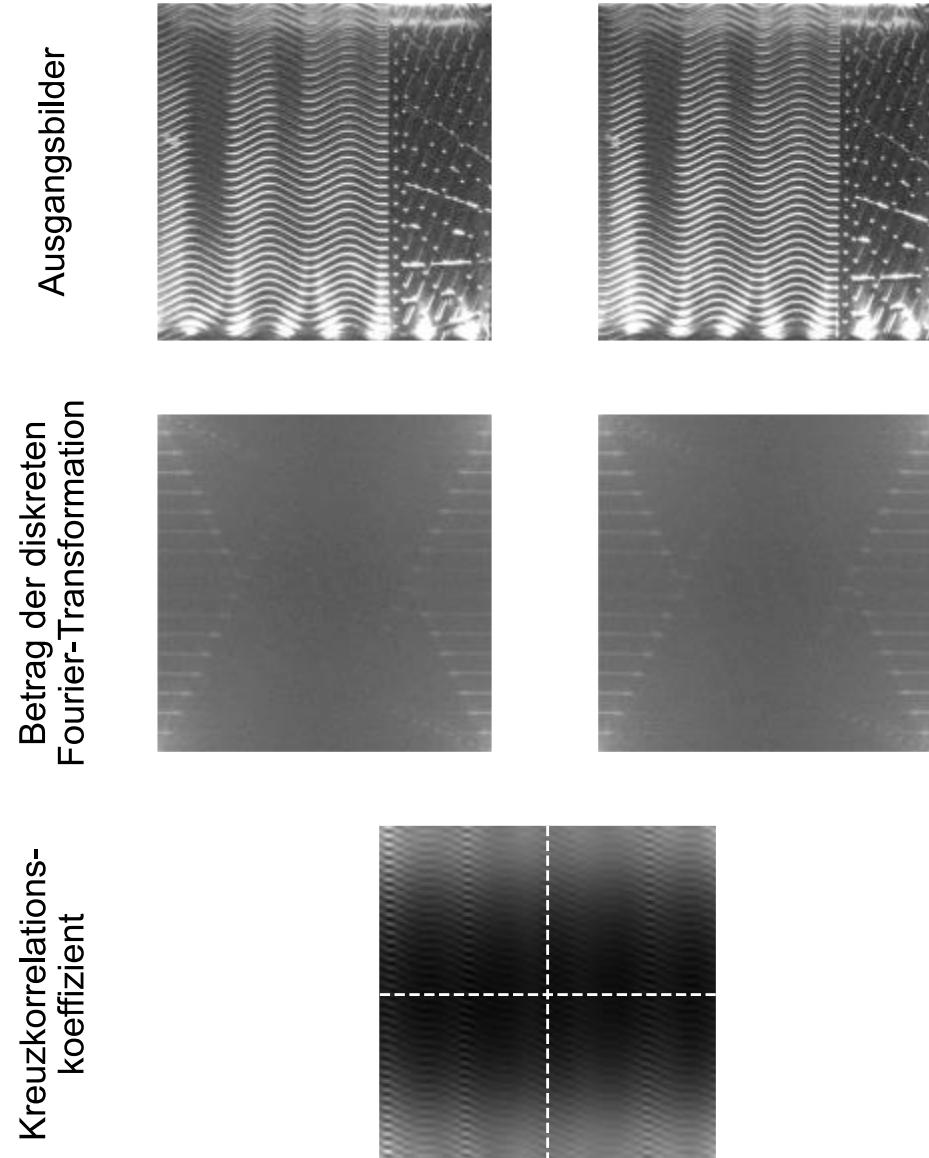


Abbildung 6-5 schrittweise Darstellung der Phase Cross Correlation

Im Vergleich zur Phase Cross Correlation ist die Implementierung von SIFT deutlich komplexer, so dass auf bestehende Bibliotheken in openCV⁶ zurückgegriffen wird.

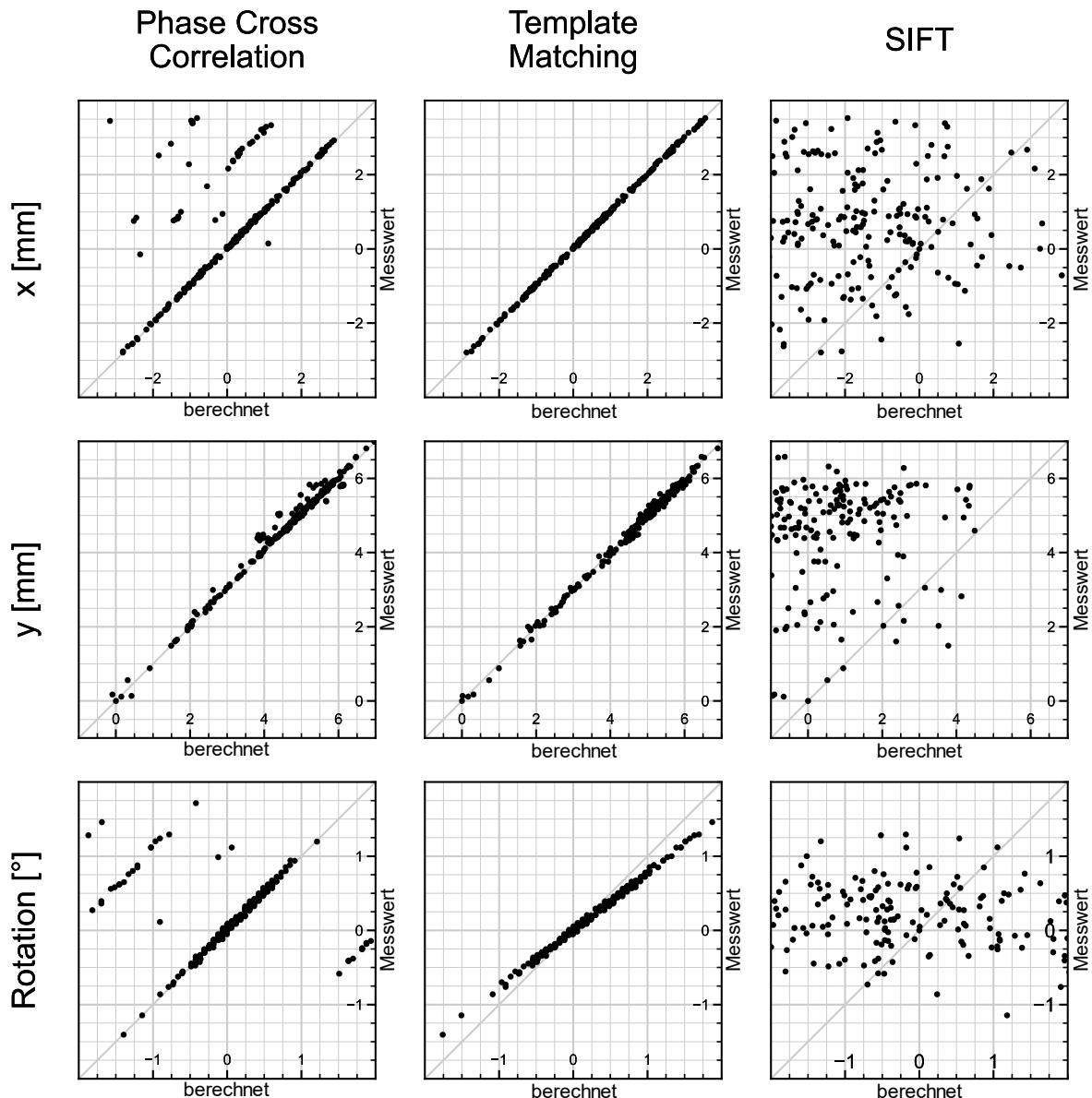


Abbildung 6-6 Vergleich verschiedener Auswertealgorithmen

Abbildung 6-6 vergleicht die zuvor ausgewählten Auswerteverfahren mit den Messdaten. Dabei sind die Messdaten auf der Ordinate aufgetragen, die zugehörigen Ergebnisse der Bildauswertung sind auf der Abszisse aufgetragen. Die untersuchten Auswerteverfahren sind in den Spalten dargestellt, in den Zeilen erfolgt der Vergleich der Positionsdaten in x-Richtung, in y-Richtung sowie die errechnete Rotation.

⁶ https://docs.opencv.org/3.4/d7/d60/classcv_1_1SIFT.html, zuletzt abgerufen: 03.08.2023

Weiterhin ist in den Diagrammen die Winkelhalbierende eingezeichnet, die einer exakten Übereinstimmung entspricht. Tabelle 6-5 gibt Aufschluss über den Fehleranteil bei einer Grenze von $\pm 0,1$ mm. Die Resultate aus den gewählten Verfahren werden nachfolgend diskutiert.

Tabelle 6-5 Anteil der Fehler <0,1 mm, je Verfahren

Gesamtanzahl	Grenze	Verfahren	Richtung	Anzahl	Relativ
250	$\pm 0,1$ mm	PCC	x	203	81,2 %
			y	193	77,2 %
		Patch	x	249	99,6 %
			y	231	92,4 %
		SIFT	x	43	17,2 %
			y	12	4,8 %

Phase Cross Correlation

Bei der Auswertung der Phase Cross Correlation ist zu erkennen, dass 81,2 % (x) beziehungsweise 77,2 % (y) der Messwerte im Bereich von $\pm 0,1$ mm der Verschiebungen liegen. Daneben sind jedoch ebenfalls Artefakte in Form von parallel verschobenen Geraden zu erkennen. Deutlich zu erkennen ist dies insbesondere bei der Verschiebung in x-Richtung. Die Verschiebung entspricht dem ungefähren Abstand der Struktur im Flowfield der untersuchten Bipolarplatte. Das wiederkehrende Muster sorgt somit für Fehlkalkulationen. Aufgrund der Berechnungsmethodik sind diese Artefakte auch in der Rotation zu erkennen, nach Formel 6-3 sind diese dadurch auch in geringerem Maß in der y-Abweichung enthalten. Ein Beispiel eines falsch erkannten Maximums ist in Abbildung 6-7 dargestellt. Die erkannten Maxima sind gelb umrandet und nach deren Intensität nummeriert. Der logarithmierte Wert wurde ergänzt. Bei Maximum (3) handelt es sich um die tatsächliche Verschiebung. Maximum (1) sowie (2) entsprechen einer negativen Verschiebung, so dass die betragsmäßige Abweichung nochmals verstärkt wird. Die Gesamtabweichung beträgt damit 35 Pixel in x-Richtung des Bauteils, somit etwa 4,5 mm. In y-Richtung des Bauteils erwies sich das Verfahren als robust.

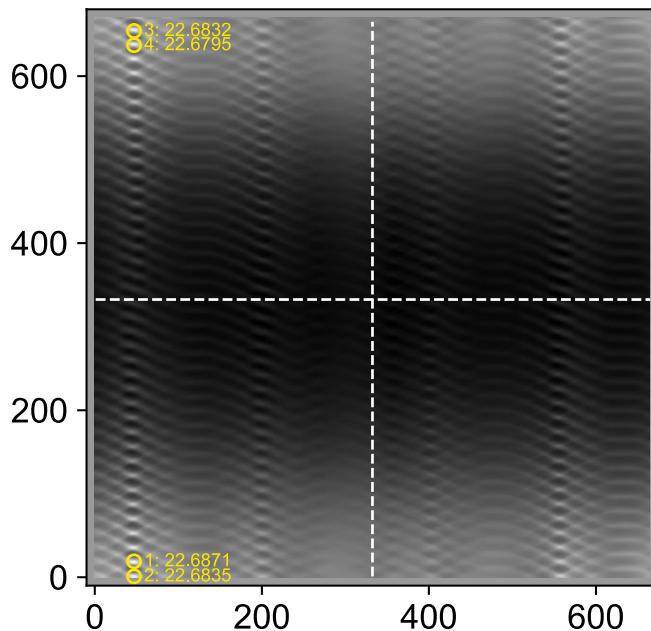


Abbildung 6-7 Kreuzkorrelation mit erfassten Maxima

Sofern von einer Bereitstellungsgenauigkeit ausgegangen werden kann, die geringer als der Strukturabstand ist, können die Messergebnisse entsprechend eingegrenzt werden.

Template Matching

Das Template Matching zeigt eine deutlich höhere Stabilität im Vergleich zur Phase Cross Correlation. In x-Richtung liegt nur ein Messwert außerhalb des Fehlerintervalls von $\pm 0,1$ mm, in y-Richtung liegen 7,6 % der Messwerte außerhalb des Intervalls.

Das bessere Abschneiden im Vergleich zur Phase Cross Correlation hängt nicht zuletzt mit der geeigneten Auswahl des Templates zusammen. Dabei wurden bewusst Bereiche der Bipolarplatte einbezogen, die keine wiederkehrenden Strukturen aufweisen, in diesem Beispiel die Verteilstrukturen. Der für die Versuche verwendete Bereich der rechten Kamera R ist in Abbildung 6-8 (links) gelb umrandet. Zur Berechnung der Verschiebung wird das Referenzbild ebenfalls auf den gelb markierten Bereich zugeschnitten (Abbildung 6-8, mittig). Der Bildausschnitt wird anschließend analog zu dem Vorgehen der Phase Cross Correlation über den Kreuzkorrelationskoeffizienten verglichen. Analog zur Phase Cross Correlation lässt sich die Helligkeit als Übereinstimmungsmaß interpretieren. Das identifizierte Maximum ist in Abbildung

6-8 (rechts) markiert. Die Koordinaten entsprechen dabei der Position der linken, oberen Ecke des verwendeten Patch.

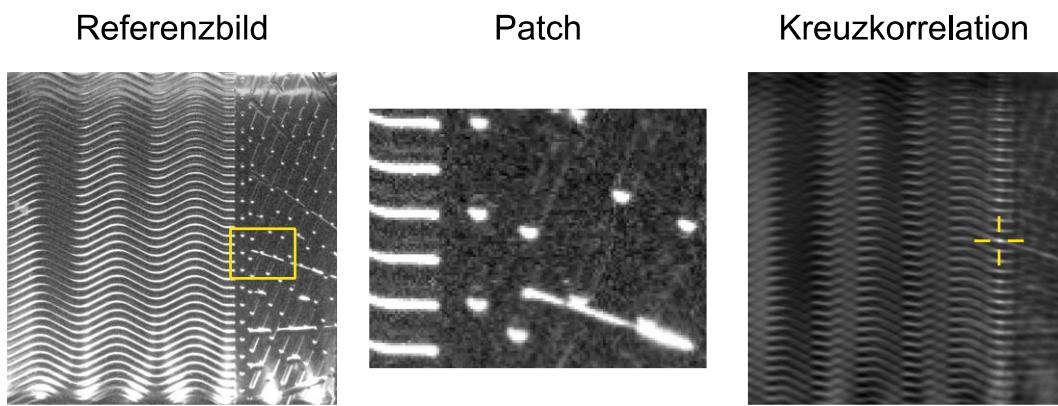


Abbildung 6-8 Beispiel der Anwendung und Auswertung des Template Matching

In der Rotation ist eine geringe, aber systematische Abweichung zu erkennen. Dies lässt sich damit begründen, dass die Bildausschnitte außerhalb des Zentrums liegen. Entsprechende Korrekturen aus den bekannten Verschiebungen der Bildausschnitte können hier angewendet werden. Fehler in der Rotationsbestimmung können ursächlich für die geringere Genauigkeit in y-Richtung sein.

Das Template Matching zeigt zunächst ein hohes Potential. Einschränkend ist aber, dass von dem eigentlichen Bild stets nur ein Ausschnitt betrachtet wird und dementsprechend nicht die volle Informationsfülle ausgeschöpft wird. Es zeigt gleichzeitig aber auch, dass ein deutlich kleinerer Sensor bei entsprechender Positionierung innerhalb einer geeigneten Region of Interest (ROI) für eine Bestimmung der Position geeignet ist.

SIFT

Bei den Ergebnissen der SIFT ist keine Korrelation zwischen den Messergebnissen und den Auswerteergebnissen zu erkennen. Eine besondere Herausforderung für das Verfahren stellen die ähnlichen und wiederkehrenden Strukturen der Bipolarplatte dar.

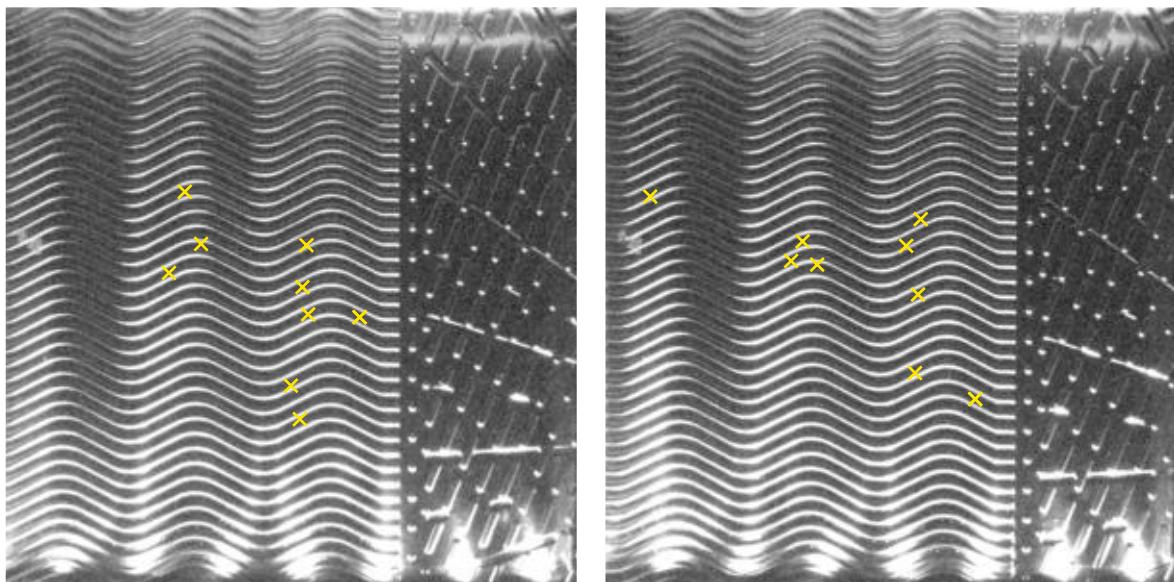


Abbildung 6-9 Zwischen zwei Bildern erkannte und zugeordnete Punkte

Abbildung 6-9 zeigt links das Referenzbild, rechts ein Bild dessen Translation und Rotation zu bestimmen sind. Neun Punkte, die die höchste Übereinstimmung untereinander aufgewiesen haben, wurden markiert. Es wird deutlich, dass die Punkte falsch zugeordnet werden. Weiterhin ist die Berechnung selbst deutlich komplexer im Vergleich zu den vorangegangenen Verfahren. Die gezeigte Herausforderung, dass Fehlzuordnungen zu vermeiden sind, bedingt einen größeren Anpassungsaufwand. Eine Übertragung auf andere Bipolarplatten kann dabei nicht immer gewährleistet werden.

Der Vorteil der Bestimmung affiner Transformationen kommt nicht zum Tragen, da für den Anwendungsfall ausschließlich euklidische Transformationen zu bestimmen sind. Aufgrund der hohen Abweichung werden SIFT sowie ähnliche Verfahren wie ORB (*Oriented FAST and Rotated BRIEF*) oder SURF (*Speeded Up Robust Features*) nicht weiter untersucht.

Auswahl eines geeigneten Auswerteverfahrens

Das Template Matching hat gezeigt, dass es eine hohe Stabilität aufweist. Die Phase Cross Correlation hingegen zeigt keine hohe Übereinstimmung, was jedoch insbesondere an Parallelverschiebungen liegt. Im Vergleich zum Template Matching kann das Potential jedoch als höher angesehen werden, da mehr Informationen berücksichtigt werden. Störende Einflüsse durch ungleichmäßige Beleuchtung sind nicht zu beobachten.

Die beiden Verfahren sollen daher nachfolgend miteinander verknüpft werden. Durch das Template-Matching wird eine Eingrenzung des Lösungsraums vorgenommen. In der Phase Cross Correlation wird anschließend eine Feinauswahl getroffen.

Weiterhin ist in den Bildern der Kreuzkorrelation zu erkennen, dass die Übergänge regelmäßig sind. Ohne Interpolation sind die Ergebnisse dennoch auf den Pixelabstand beschränkt. Durch eine Interpolation soll betrachtet werden, ob sich die Genauigkeit weiter steigern lässt, so dass eine Subpixelgenauigkeit erreicht werden kann.

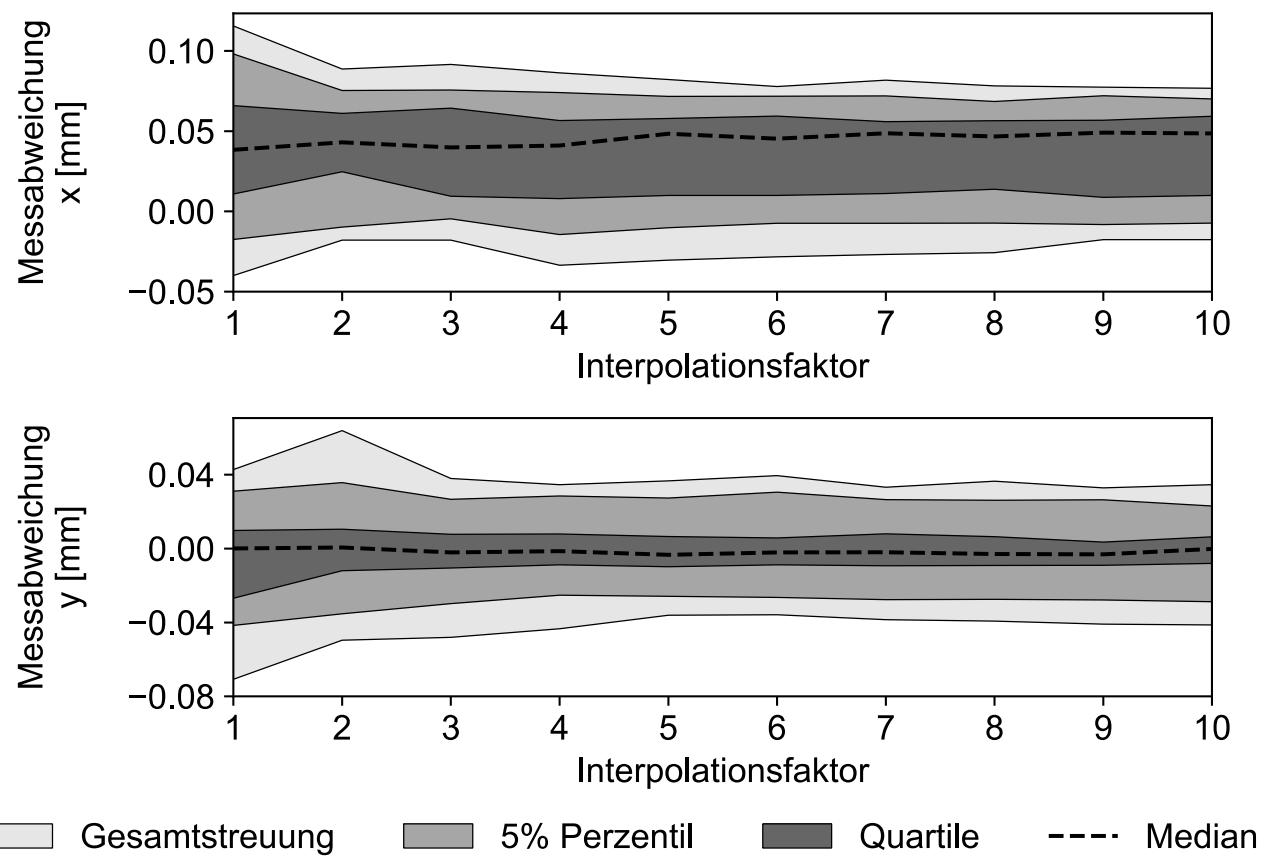


Abbildung 6-10 Einfluss des Interpolationsfaktors auf die Messgenauigkeit

In Abbildung 6-10 wurde eine Phase Cross Correlation ohne die in Abbildung 6-6 zu erkennenden Ausreißer mit einem zusätzlichen Interpolationsfaktor durchgeführt. Es wurden die bereits in Abbildung 6-6 verwendeten und dargestellten Versuchsergebnisse verwendet. Durch eine Interpolation soll insbesondere die Genauigkeit erhöht werden, da dadurch Ergebnisse im Subpixel-Bereich berechnet werden können. In der Abbildung ist zu sehen, dass eine Veränderung des Interpolationsfaktors vor allem Ausreißer beeinflusst. Dies spiegelt auch die Erwartungshaltung wider, da Ausreißer vor allem dann entstehen können, wenn das

tatsächliche Maximum genau zwischen zwei Pixeln liegt (vgl. Abbildung 6-5, rechts unten). Aufgrund des verwendeten Versuchsaufbaus mit gegenüberliegender Betrachtung und daraus resultierenden Abweichungen kann es zu Messfehlern kommen, die anhand der Versuchsdaten nicht beurteilt werden können. Ein Interpolationsfaktor, der größer als 10 ist, leistet keinen Beitrag zu einer weiteren Erhöhung der Genauigkeiten. Die Abweichung konnte um etwa 40 % reduziert werden. Weiterhin konnte demonstriert werden, dass durch den gewählten Ansatz Genauigkeiten unterhalb des Pixelabstandes erreicht werden können.

Tabelle 6-6 Einfluss der Interpolation auf die Messgenauigkeit

	Vor Interpolation	Nach Interpolation	Veränderung
x_{\max}	0,116 mm	0,077 mm	
x_{\min}	- 0,040 mm	- 0,018 mm	
Δx	0,156 mm	0,095 mm	- 39,1 %
y_{\max}	*0,064 mm	0,035 mm	
y_{\min}	- 0,070 mm	- 0,041 mm	
Δy	0,134 mm	0,076 mm	- 43,3 %

*es wurde das Maximum aus Stufe 2 verwendet

Einschränkend bei den gewählten Verfahren ist zu vermerken, dass die Zuordnung in y-Richtung bei der untersuchten Bipolarplatte durch die mäandrierende Struktur unterstützt wird. Technische Verbreitung finden hingegen auch Bipolarplatten mit geradlinigem Flowfield. Gleichwohl haben die Ergebnisse des Template Matchings aber auch gezeigt, dass unter Berücksichtigung der Verteilstruktur bereits ausreichend gute Ergebnisse erzielt werden können. Zuletzt wurde in Kapitel 2.6.2 hervorgehoben, dass vor allem die Ausrichtung der Kanäle entscheidenden Einfluss auf die Funktionsfähigkeit hat. Bei einem geraden Flowfield betrifft dies insbesondere die x-Richtung.

Zusammenfassung: In den Voruntersuchungen wurde gezeigt, dass bildauswertende Verfahren unter Nutzung einer Phase Cross Correlation geeignet sind, um die Funktion „Position und Orientierung bestimmen“ zu erfüllen. Mit den Verfahren ohne Anpassung konnte jedoch nicht die gewünschte Genauigkeit erreicht werden. Die beiden Verfahren einer Phase Cross Correlation sowie des Template Matching sollen daher im weiteren Verlauf miteinander kombiniert werden, eine Interpolation soll integriert sein. Die bisherigen Betrachtungen zur Positionsbestimmung wurden ausschließlich statisch durchgeführt. Nach Implementierung eines angepassten Auswertealgorithmus soll darauf aufbauend exemplarisch ein System zur Stapelbildung gesamtheitlich betrachtet werden. Dies inkludiert eine Toleranzbestimmung des Handhabungsgeräts und darüber hinaus die Integration eines Korrektursystems. Weiterhin konnte durch den gewählten Versuchsaufbau, bei der Kameras und Referenzmesssystem gegenüberliegend positioniert sind (vgl. Abbildung 6-4), die Genauigkeit nicht abschließend bewertet werden. Anhand der ermittelten Standardabweichungen der Teilprozesse soll daher abschließend eine Bewertung des Messsystems erfolgen.

6.3 Gesamtversuchsaufbau

Abbildung 6-11 veranschaulicht graphisch die wesentlichen Schritte der Bildverarbeitung. Dargestellt ist dabei ausschließlich eine der beiden Kameras. Die Bestimmung der anderen Kamera erfolgt analog dazu.

Zunächst wird, während das erste Bauteil gegriffen wird, ein Referenzbild erzeugt (a). Bei jedem weiteren Greifen eines Bauteils wird das zu bestimmende Bild aufgenommen (b). Es folgt für beide Bilder eine Vorverarbeitung zur Entzerrung. Weiterhin werden diejenigen Bildausschnitte abgeschnitten, die nicht das Bauteil zeigen, eine starke Überbelichtung aufweisen oder Randeffekte durch die Entzerrung zeigen (c), (d).

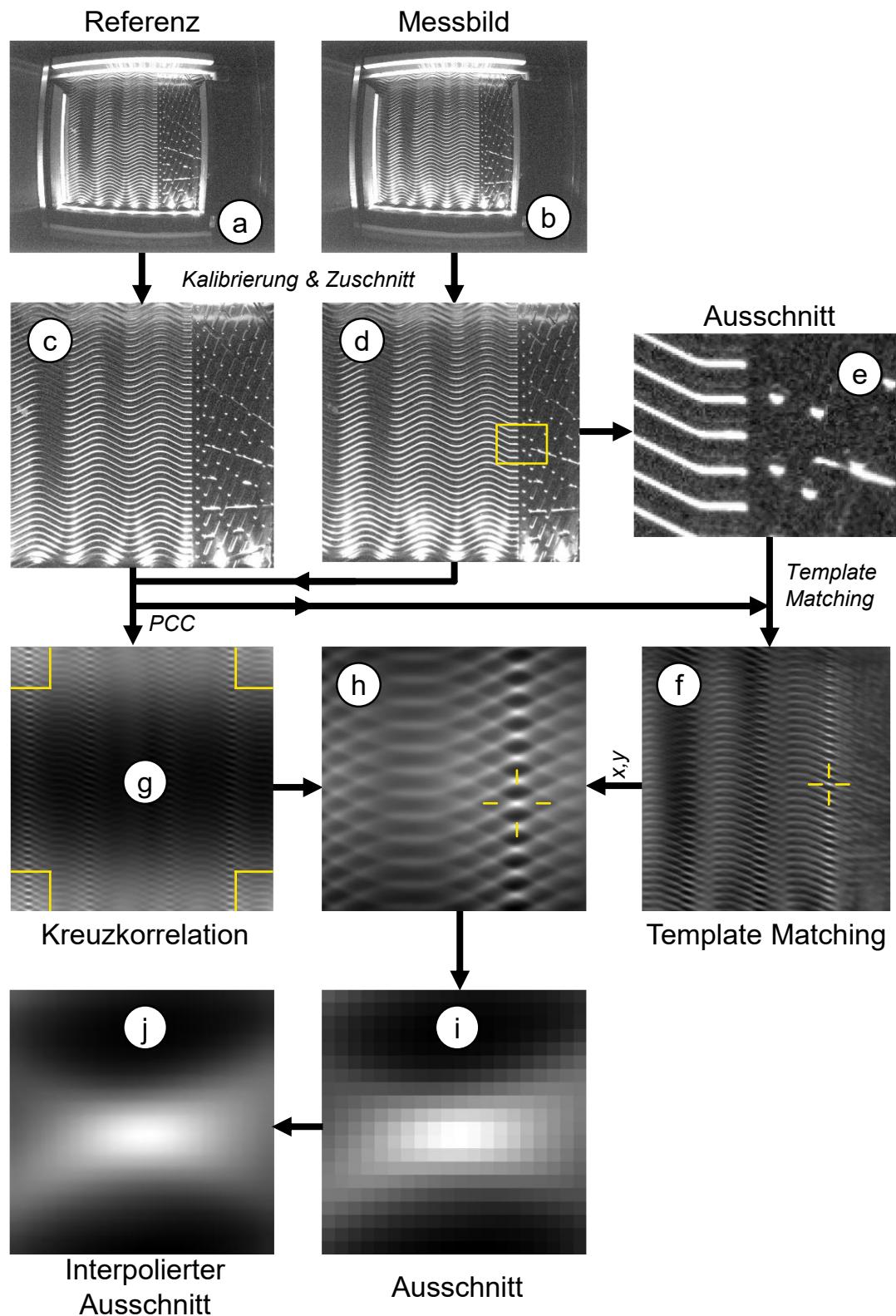


Abbildung 6-11 Berechnungsschritte der Auswertung

Neben den Kalibrierdaten der Kameras muss anschließend ein Ausschnitt definiert werden. Wie bereits zuvor dargestellt, sollte dieser so gewählt werden, dass vorkommende Muster nur in geringem Maße wiederholt werden. Bei Bipolarplatten eignet sich dafür insbesondere der Verteilbereich. Für diesen Ausschnitt (gelbe Markierung in d) wird gemeinsam mit Bild (c) ein Template Matching durchgeführt. Vorteilhaft dabei ist die hohe Robustheit des Verfahrens gegenüber wiederkehrenden Strukturen. Nachteilig ist jedoch, dass nicht der volle Informationsgehalt ausgeschöpft wird. Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Phase Cross Correlation (PCC) mit den Bildern (c), (d) durchgeführt, das entsprechende Resultat ist in (g) dargestellt.

Allgemein kann in dem Anwendungsfall von geringen Verschiebungen von wenigen Millimetern ausgegangen werden. Diese Verschiebungen befinden sich, je nach deren Vorzeichen, in den vier Ecken des erzeugten Bildes (gelbe Markierung in g). Insbesondere Verschiebungen nahe 0 mm können allerdings durch die entstehenden Randeffekte beeinflusst werden. Das Bild wird daher neu zusammengefügt, so dass die Bildmitte eine Verschiebung von (0,0) mm abbildet.

Aus dem Template Matching (f) lässt sich das Intensitätsmaximum bestimmen, das die Position des gewählten Bildausschnittes wiedergibt. Der Bildausschnitt ist bekannt, so dass sich dieser in Bild (h) übertragen lässt (gelbe Markierung). In Bild (h) selbst wird keine weitere Bestimmung eines Maximums vorgenommen. Es ist zu erwarten, dass sich das tatsächliche Maximum im Bereich weniger Pixel des durch das Template Matching bestimmten Maximums befindet. Aus diesem Grund wird der Bildausschnitt weiter zu Bild (i) reduziert. Der Bildausschnitt sollte so gewählt werden, dass keine wiederkehrenden Strukturen zu erkennen sind. In dem dargestellten Fall wurden 10 Pixel als ausreichend erachtet. Dies entspricht einem Abstand von etwa 1,29 mm (siehe Formel 6-1). Die Aussagekraft von Bild (i) ist aber weiterhin durch den gegebenen Pixelabstand limitiert. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Genauigkeit durch Anwendung einer Interpolation erhöhen lässt. Dies wird dadurch unterstützt, dass die Bilddaten, im Gegensatz beispielsweise zu einer Kantendetektion, relativ gleichmäßige Übergänge abbilden. Für die Auswertung wurde eine quadratische Interpolation gewählt. In dem dargestellten Fall wurde eine 100-fache Interpolation gewählt (siehe j). Vorversuche haben allerdings gezeigt, dass auch geringere Interpolationen als ausreichend erachtet werden können.

Zuletzt wird anhand von Bild (j) das Maximum bestimmt. Durch die erfolgte zentrierte Darstellung lässt sich dieses Maximum unter Berücksichtigung des Interpolations-

faktors sowie der Pixelgröße aus den Kalibrierdaten direkt in eine Verschiebung überführen. Die dargestellte Berechnung wird während jedes Greifvorgangs an beiden Kameras durchgeführt. Unter Anwendung von Formel 6-3 kann daraus die Bauteilverschiebung um den Mittelpunkt des Greifers bestimmt werden.

Diese Daten können direkt der Steuerung des Handhabungssystems übergeben werden (siehe Architektur in Abbildung 4-7). Das Handhabungssystem kann entsprechend den Ablagepunkt korrigieren.

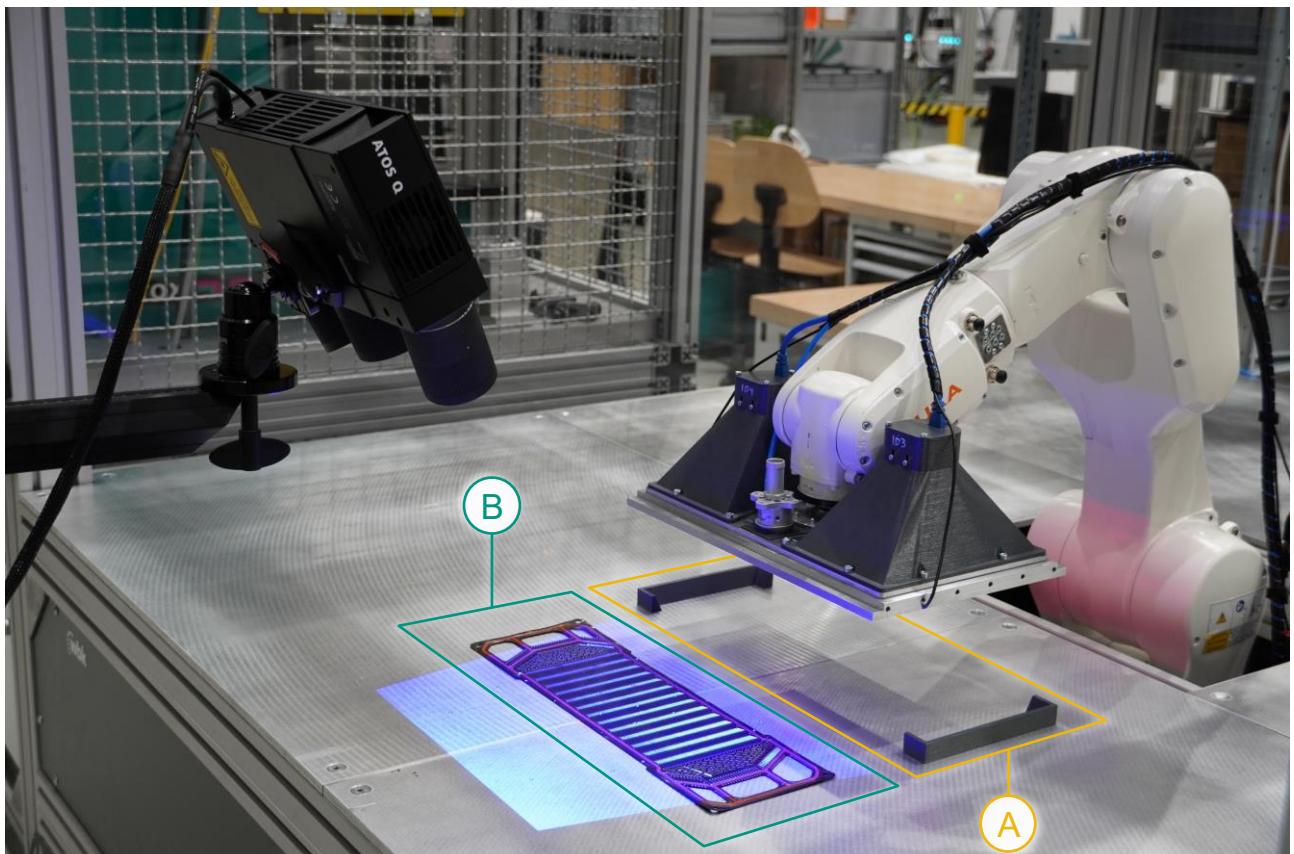


Abbildung 6-12 Versuchsaufbau zur Validierung

Abbildung 6-12 zeigt den zur Validierung verwendeten Versuchsaufbau. Der Roboter hat eine Greifposition (A), die das Magazin abbilden soll, sowie eine Ablageposition (B), die dem Stapel entspricht. Als Position wurde dabei eine ebene Fläche gewählt, da gezielt die Prozessfähigkeit des Greifers bewertet werden soll. Um eine Referenzmessung zu ermöglichen, wurde die Bipolarplatte mit Referenzmarken präpariert. Nach jedem Ablagevorgang wurde die Position der Referenzpunkte erfasst und mit dem zuvor bereits angewandten Kabsch-Algorithmus (siehe S. 70) wurde die Bauteilposition in x und y bestimmt. Nachfolgend werden die wesentlichen Schritte der Versuchsdurchführung beschrieben.

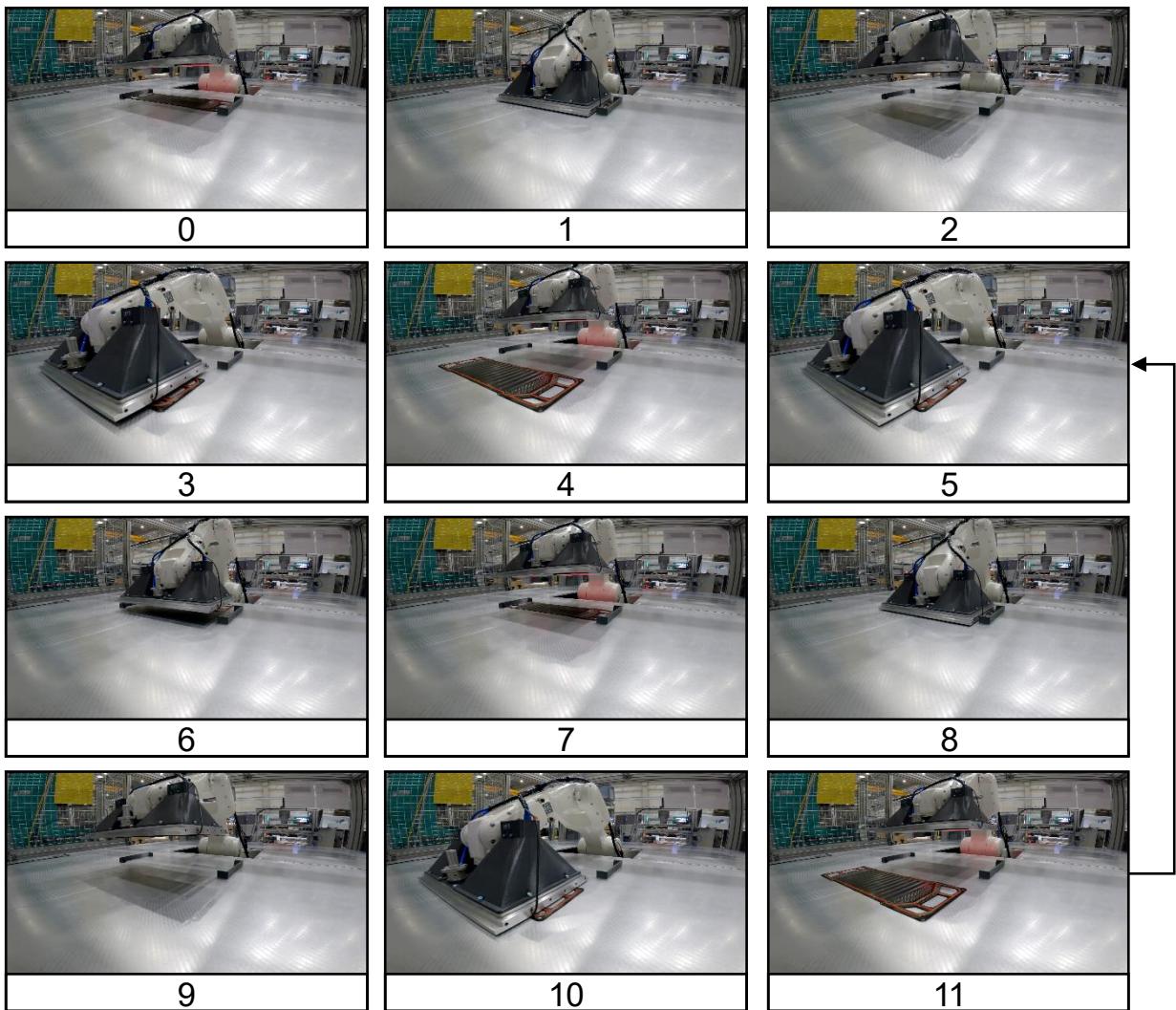


Abbildung 6-13 wesentliche Schritte der Versuchsdurchführung

Schritt 0:

Die Bipolarplatte befindet sich in dem angedeuteten Magazin (A). Die Bereitstellungsgenauigkeit des Magazins ist gering.

Schritt 1:

Der Greifer fährt nun die Bipolarplatte im Magazin an und greift diese (vgl. Abbildung 4-7, $P_{Aufnahme}$). Aufgrund der Erkenntnisse aus den Vorversuchen erfolgt das Greifen mit einem definierten Abstand von 1 mm, um mögliche Stör-einflüsse zu vermeiden

Schritt 2:

Der Roboter fährt die Ablageposition (B) an. Während dieser Bewegung werden zum Zeitpunkt t_{Mess} (vgl. Abbildung 4-7) zwei Referenzbilder durch die beiden Kameras erzeugt.

Schritt 3:

Die Bipolarplatte wird in Position (B) (vgl. Abbildung 4-7, P_{Ablage}) abgelegt. Der z-Abstand bei der Bauteilablage beträgt 1 mm.

Schritt 4:

Die Position der Bipolarplatte wird durch das Referenzmesssystem bestimmt.

Schritt 5:

Der Roboter greift die Bipolarplatte von einem fest definierten Punkt (B) aus.

Schritt 6:

In der Robotersteuerung werden zwei Zufallswerte erzeugt. Diese Zufallswerte werden dann der Ablageposition (A) im Magazin jeweils in x-Richtung und in y-Richtung überlagert. Das Bauteil wird in der mit Zufallswerten behafteten Position abgelegt. Weiterhin wird das Bauteil aus etwa 10 mm Abstand fallen gelassen, um eine weitere Streuung zu erzielen. Durch dieses Vorgehen soll eine geringe Bereitstellungsgenauigkeit abgebildet werden.

Schritt 7:

Der erste Greifprozess ist abgeschlossen, es wird die Home-Position angefahren.

Schritt 8:

Die Bipolarplatte wird in (A) erneut gegriffen, vgl. Schritt 0.

Schritt 9:

Während des Greifens wird mit dem Trigger-Zeitpunkt t_{Mess} ein Bild angefertigt, das über den zuvor beschriebenen Algorithmus mit den Referenzbildern (Schritt 2) verglichen wird. Es werden entsprechende Korrekturdaten (vgl. Abbildung 4-7, P_{Korr}) erzeugt, die der Robotersteuerung übermittelt werden.

Schritt 10:

Die Ablage der Bipolarplatte erfolgt in der Position A. Im Gegensatz zu Schritt 3 wurden der Ablageposition jedoch die in Schritt 9 ermittelten Korrekturwerte überlagert.

Schritt 11:

Die Position der Bipolarplatte wird durch das Referenzmesssystem bestimmt.

Schritt 6 bis Schritt 11 können anschließend beliebig oft wiederholt werden. Zur nachfolgenden Analyse werden die erzeugten Zufallswerte der Robotersteuerung (Schritt 6), die angefertigten Bilder (Schritt 2, Schritt 9) sowie die ermittelten Korrekturwerte gespeichert.

Die Genauigkeit ist darüber hinaus ebenfalls durch das Handhabungssystem limitiert. Das Handhabungssystem liegt außerhalb des Betrachtungshorizonts der vorliegenden Arbeit, dennoch ist es zur Bewertung der folgenden Ergebnisse entscheidend, dieses zu charakterisieren. Hierzu wurde der Versuchsablauf wie zuvor beschrieben durchgeführt, allerdings ohne das Bauteil zu greifen sowie ohne zusätzliche Zufallswerte. In der Ablageposition (Schritt 3, Schritt 10) wurde ein Wartebefehl eingefügt. Durch das Referenzmesssystem wurde die Position des Greifers an drei Punkten (1, 2, 3) bestimmt. Bremsvorgänge und Verfahrgeschwindigkeiten wurden nicht variiert, da es sich dabei um Spezifika des Handhabungsgeräts handelt. Der Versuch wurde unter der gleichen Parametrierung durchgeführt.

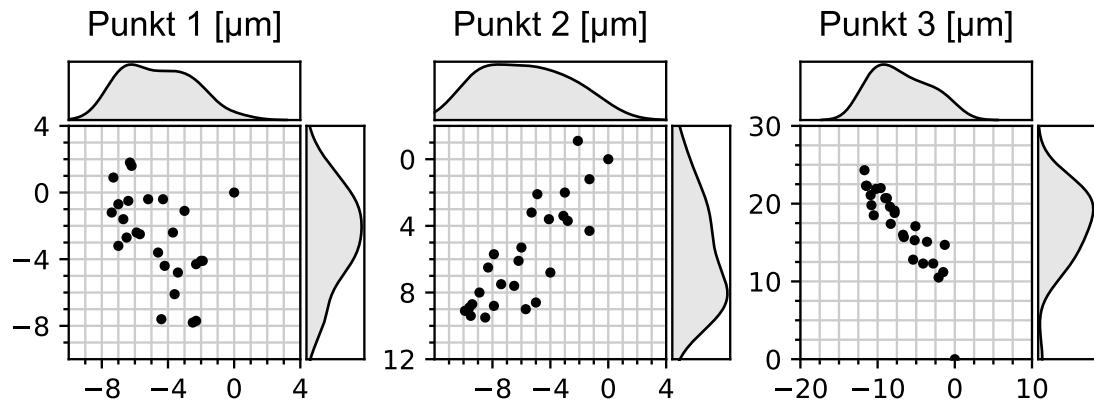


Abbildung 6-14 Wiederholgenauigkeit des Roboters an drei Messpunkten

Abbildung 6-14 zeigt die Positionsabweichungen in der Ebene sowie die dazugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, Tabelle 6-7 liefert die dazugehörige statistische Auswertung. Die Ursache des Ausreißers in Punkt 3 konnte nicht ermittelt werden. Es handelt sich um den ersten Referenzpunkt (0,0). Weiterhin konnte ein geringer Drift detektiert werden. Eine Veränderung der Kameraposition kann ausgeschlossen werden, da als Referenzmessung der Ablagetisch herangezogen wurde.

Tabelle 6-7 Standardabweichungen verschiedener Messpunkte am Greifer

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
x	1,99 μm	2,86 μm	3,48 μm
y	2,67 μm	3,10 μm	5,07 μm
xy-Ebene	3,33 μm	4,21 μm	6,15 μm
z	11,14 μm	10,50 μm	8,11 μm

Tabelle 6-7 zeigt die Standardabweichungen der Wiederholgenauigkeit an den drei Messpunkten. Auffällig ist, dass es in z-Richtung in der betrachteten Pose zu deutlich größeren Positionsabweichungen kommt. Aus den vorherigen Untersuchungen ist bekannt, dass Abweichungen in z-Richtung beim Greifen einer Bipolarplatte zu Positionsabweichungen führen können. Da mit einem Abstand von 1 mm gegriffen wurde, ist jedoch davon auszugehen, dass keine Beeinflussung stattgefunden hat.

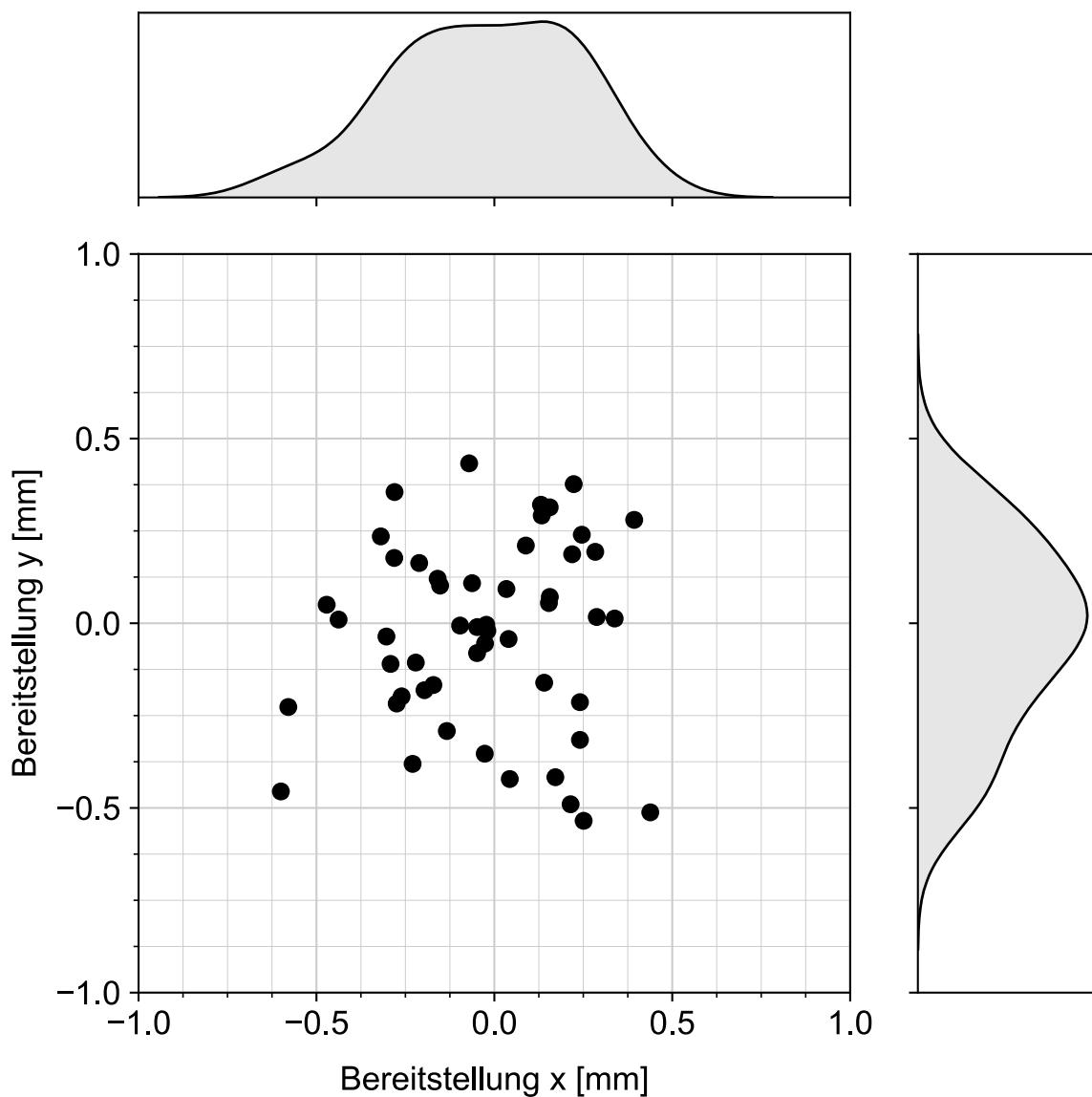


Abbildung 6-15 generierte Zufallswerte der Ablage

Abbildung 6-15 zeigt die x- und y-Werte sowie die dazugehörige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der durch die Robotersteuerung (KRC5) in Schritt 6 erzeugten Zufallswerte zur Abbildung einer unzureichenden Bereitstellungsgenauigkeit. Die Standardabweichung beträgt 0,29 mm in x-Richtung sowie 0,25 mm in y-Richtung. Neben den durch die Robotersteuerung eingebrachten Positionsabweichungen betrug der Abstand der Bipolarplatte beim Zurücklegen ins Magazin 10 mm, um die Bereitstellungsgenauigkeit weiter zu randomisieren.

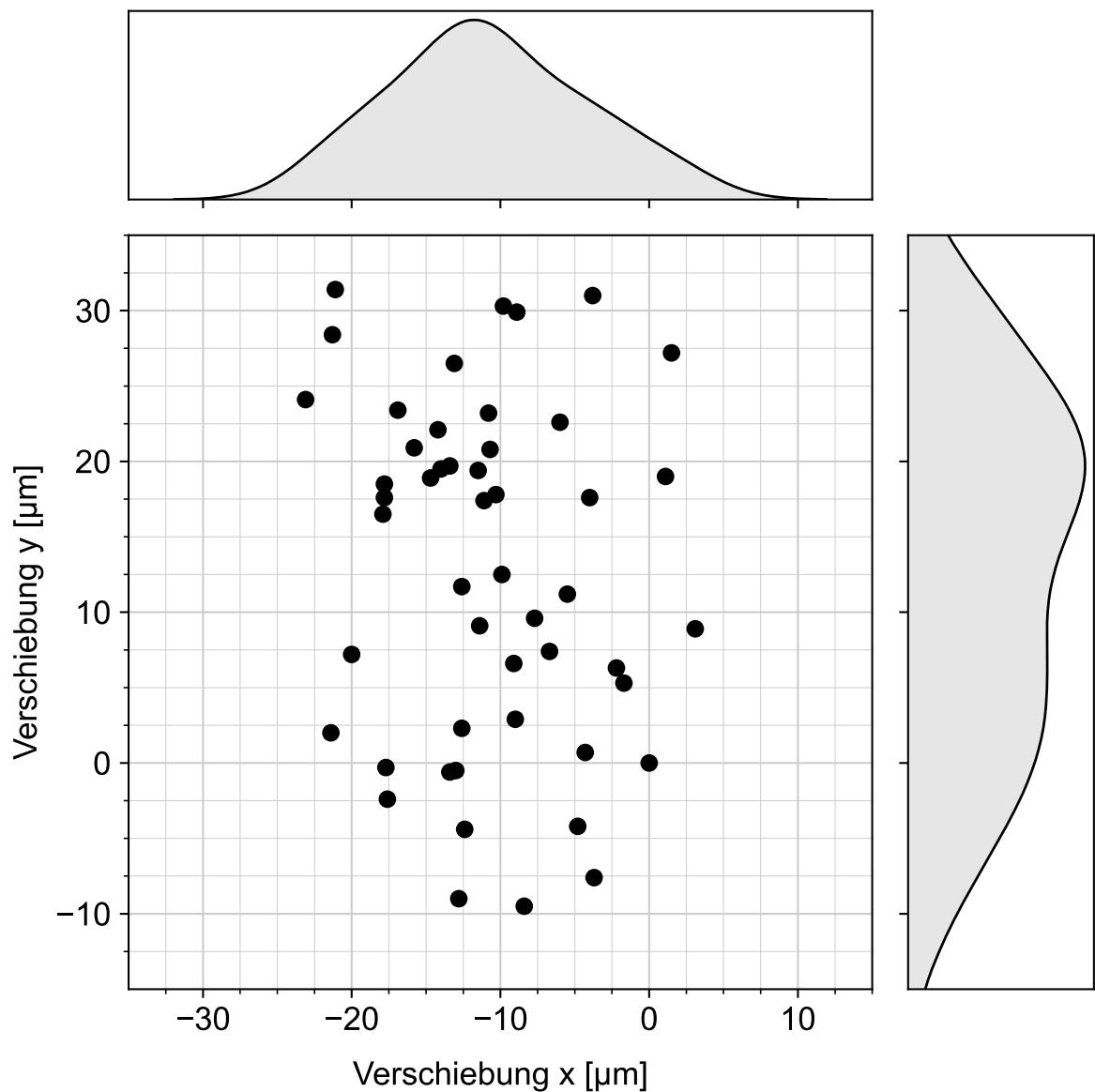


Abbildung 6-16 absolute Ablageposition der Bipolarplatte

Abbildung 6-16 zeigt graphisch aufbereitet die Verschiebungen relativ zu der ersten Ablage bei (0,0) für 50 Wiederholversuche. Dabei sind die Verschiebungen in x- und in y-Richtung dargestellt sowie die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Die resultierenden Standardabweichungen sind in Tabelle 6-8 aufgeführt.

Tabelle 6-8 Standardabweichungen, BPP, Wiederholgenauigkeit

σ	
x	11,43 μm
y	6,36 μm
xy	8,70 μm

Unter Annahme einer tolerierten Positionsabweichung von 100 µm konnte ein stabiler Prozess nachgewiesen werden. Die in Tabelle 6-8 ermittelten Prozessstreuungen entsprechen dabei der Summe der unabhängigen Zufallsvariablen des Greifprozesses, der Positionsbestimmung sowie des Handhabungsgeräts.

Funktionsrelevant ist für den späteren Einsatz insbesondere die benachbarte Genauigkeit (*engl. adjacent accuracy*) zwischen zwei Bipolarplatten. Streut die absolute Ablagegenauigkeit einer zentrierten Verteilung mit den Obergrenzen $\pm t$, so beträgt die maximal mögliche Abweichung zwischen zwei Bipolarplatten $\pm 2t$. Bei normalverteilten Zufallsvariablen gilt, dass die benachbarte Genauigkeit der Faltung zweier Normalverteilungen mit gleichem Mittelwert μ und gleicher Standardabweichung σ entspricht. Für die Berechnung der benachbarten Genauigkeit σ_{adj} gilt entsprechend der in Formel 6-6 hergeleitete Zusammenhang.

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & N(\mu_1, \sigma_1^2) * N(\mu_2, \sigma_2^2) = N(\mu_1 + \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2) & \text{Formel 6-6} \\
 (2) \quad & \text{mit } \mu_1 = \mu_2 = \mu = 0 \text{ und } \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \\
 (3) \quad & N(0, \sigma^2) * N(0, \sigma^2) = N(0, 2\sigma^2) = N(0, \sigma_{adj}^2) \\
 (4) \quad & \sigma_{adj} = \sqrt{2\sigma^2}
 \end{aligned}$$

Die Annahme Formel 6-6,(1) gilt nur für eine Faltung unabhängiger Zufallsvariablen. Da für die Berechnung der Position jedoch auf das identische Ausgangsbild zurückgegriffen wird, kann dies unter Umständen nicht erfüllt sein. Eine graphische Aufbereitung der gemessenen benachbarten Genauigkeit ist in Abbildung 6-17 dargestellt, Standardabweichungen können Tabelle 6-9 entnommen werden. Zur Einordnung des Messergebnisses ist dort ebenfalls die berechnete Standardabweichung nach Formel 6-6 hinterlegt.

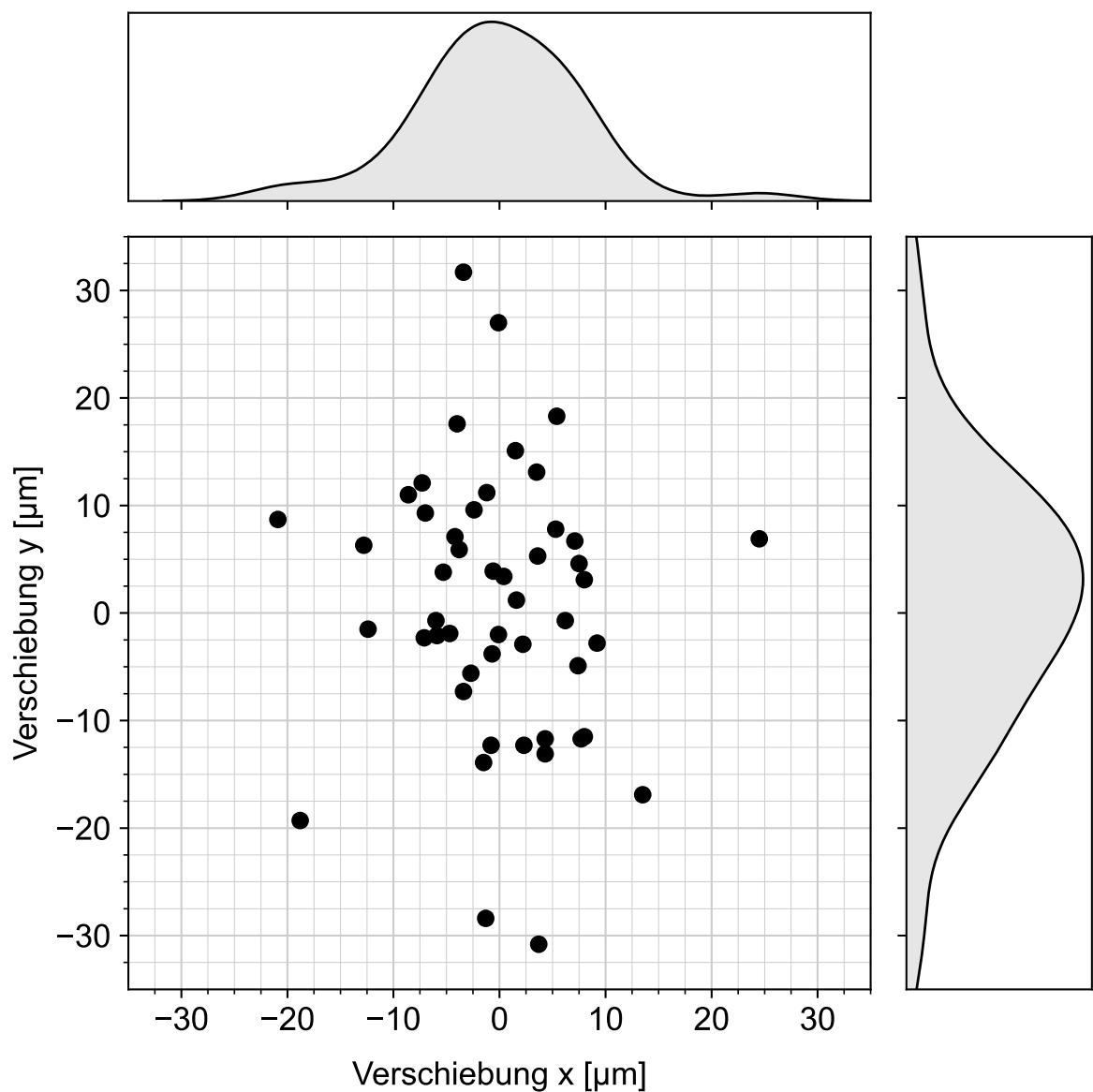


Abbildung 6-17 benachbarte Ablageposition der Bipolarplatte

Tabelle 6-9 benachbarte Genauigkeit und Gesamtgenauigkeit, gemessen

	Benachbart, gemessen	Benachbart, berechnet
x	7,76 μm	8,90 μm
y	12,31 μm	9,41 μm
xy	7,60 μm	12,30 μm

Eine Alternative zu der hier durchgeführten Vorgehensweise wäre die Verwendung des vorangegangenen Bildes zur Positionierung. Dies bringt allerdings bei systematischen Abweichungen die Gefahr mit sich, dass die Gesamtgenauigkeit schlechter wird.

6.4 Bewertung

Ziel des Gesamtsystems war es eine Positioniergenauigkeit von $\pm 0,1$ mm am funktionsrelevanten Merkmal des Flowfields zu erzielen. Zur Demonstration wurde ein Handhabungssystem ausgewählt, das dazu in der Lage ist, erforderliche Genauigkeiten zu erfüllen. Es wurde darüber hinaus eine Messmethode ausgewählt und implementiert, die dazu in der Lage ist, Messwerte in der erforderlichen Güte zu liefern. Dabei wurde das System schrittweise validiert. Zunächst wurde ein Messdatensatz erzeugt, zu dem rückwärtige Kameraaufnahmen angerfertigt wurden.

Von den untersuchten Methoden lieferten jene mit einer Auswertung im Frequenzbereich die präzisesten Ergebnisse. Merkmalsextraktionsmethoden hingegen haben sich für den untersuchten Anwendungsfall aufgrund sich wiederholender Geometrien als unzureichend erwiesen. Bestehende Algorithmen zur Auswertung wurden anschließend adaptiert und miteinander kombiniert, um eine weitere Verbesserung zu erzielen.

In der folgenden Integrationsstufe wurde das System anschließend mit der Steuerung verbunden. Das greiferintegrierte Messsystem lieferte dabei die Messwerte an den Roboter, sodass dieser in der Lage war, eine Korrekturbewegung durchzuführen. Um den Anwendungsfall hinreichend abzubilden, wurde dem Prozess eine Streuung überlagert.

Das System war anschließend dazu in der Lage, trotz der Ungenauigkeiten in der Bereitstellung eine präzise und wiederholgenaue Ablage zu ermöglichen. Die ermittelte Genauigkeit liegt in der gleichen Größenordnung wie die ermittelte Wiederholgenauigkeit des Handhabungsgeräts. Die Streuung liegt damit unterhalb der in der Montage zulässigen Streuung, eine Prozessfähigkeit ist gewährleistet.

Durch das gewählte Merkmal des Flowfields ist eine kurze Toleranzkette gegeben. Das Merkmal „Ausrichtung des Flowfields“ ist darüber hinaus nur von der Genauigkeit des Umformwerkzeuges sowie der Schweißvorrichtung abhängig. Die Genauigkeit eines Umformwerkzeuges kann als hoch angenommen werden. Das System ist somit dazu

in der Lage, die Anforderungen an eine hohe **Präzision anhand funktionsrelevanter Merkmale** zu erfüllen.

Dies unterstreicht die Stärken des hier gewählten Ansatzes. Neben der Kalibrierung ist nur eine geringe Adaption an spezifische Merkmale notwendig. Durch das gewählte Vorgehen wird gezielt die benachbarte Genauigkeit zweier Bipolarplatten erhöht, wobei keine zusätzlichen Messfeatures notwendig sind. Somit erfüllt das System die Anforderung an eine **hohe Universalität**.

7 Gesamtsystem

In den vorherigen Kapiteln wurden einzelne Einflüsse auf die Genauigkeit ermittelt. Diese sollen abschließend in das Gesamtsystem überführt werden. Die Analyse bezieht sich dabei auf die in Abbildung 2-7 ermittelten geometrischen Abweichungen.

Vergleich der erzielbaren Ablagegenauigkeiten in Abhängigkeit des Bauteils

Tabelle 7-1 fasst die in dieser Arbeit durchgeführten Messergebnisse zusammen und ordnet diese den Fehlermerkmalen aus Abbildung 2-7 zu. Durch nachfolgende Maßnahmen konnte die Genauigkeit gesteigert werden:

- Das Greifen der CCM erfolgt mit einem Vakuumtisch
- Die MEA wird bei der korrekten Luftfeuchtigkeit gegriffen, es besteht kein Abstand während des Greifens
- Die Bipolarplatte wird mit geringem Abstand gegriffen und abgelegt

Tabelle 7-1 Ablagegenauigkeiten versch. Bauteile einer Brennstoffzelle

Komponente	σ	Verweis
CCM	8,5 μm	Tabelle 5-3
GDL (C, G)	1,5 μm	Tabelle 5-5
MEA (G)	2,1 μm	Tabelle 5-8
BPP (A, E)	1,3 μm	Tabelle 5-13

Die Schritte der Konfektionierung der Bauteile CCM und GDL sowie die Assemblierung der MEA liegen außerhalb der Systemgrenzen dieser Arbeit. Als Herausforderung wird beispielsweise in (Volk 2022) genannt, dass die Kantendetektion einer GDL Herausforderungen durch den Zuschnitt mit sich bringt. Weiterhin wurde in dieser Arbeit ermittelt, dass die Luftfeuchtebedingungen sowohl die Prozessschritte der Konfektionierung einer CCM (Tabelle 5-4) als auch die erzielbare Genauigkeit der Bauteilablage einer MEA (Tabelle 5-10) signifikant beeinflussen.

A: Position der Anoden-BPP zu der angrenzenden Kathoden-BPP

Tabelle 7-2 liefert einen Überblick über die für die Bipolarplatte ermittelten Prozessstreuungen. Diese wurden entsprechend der in Abbildung 4-2 dargestellten Gruppierung der Elementarfunktionen aufgeschlüsselt. Der Wert der Kameras wurde anhand von Formel 7-1 unter Annahme normalverteilter Zufallsvariablen aus der

ermittelten Gesamtstreuung des Systems berechnet. Es wurden jeweils betragsmäßige Abweichungen in der Ebene herangezogen.

Tabelle 7-2 Bestimmte Einflüsse auf die Genauigkeit des Stapelprozesses

	σ	Verweis
Greifer	$\sigma_1 = 1,30 \mu\text{m}$	Tabelle 5-13
Handhabungsgerät	$\sigma_2 = 4,56 \mu\text{m}$	Mittelwert, Tabelle 6-7
Kamera	$\sigma_3 = 7,29 \mu\text{m}$	Formel 7-1
Gesamtsystem	$\sigma_{\text{Ges}} = 8,70 \mu\text{m}$	Tabelle 6-8

$$(1) \quad N(0, \sigma_1^2) * N(0, \sigma_2^2) * N(0, \sigma_3^2) = N(0, \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) \quad \text{Formel 7-1}$$

$$(2) \quad \text{mit } N(0, \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) = N(0, \sigma_{\text{Ges}}^2)$$

$$(3) \quad \sigma_3 = \sqrt{\sigma_{\text{Ges}}^2 - \sigma_1^2 - \sigma_2^2} = 7,29 \mu\text{m}$$

Eine weitere Genauigkeitssteigerung des Handhabungssystems ist mit hohem Aufwand verbunden, gleichwohl ist der Beitrag zur Gesamtgenauigkeit gering. Bei Verkürzung der Prozesszeiten gewinnt das dynamische Verhalten und die Steifigkeit des Aufbaus an Bedeutung, dies liegt jedoch außerhalb der hier betrachteten Systemgrenzen.

Bisherige Überlegungen zur Genauigkeit der Ausrichtung des Flowfields zweier angrenzender Bipolarplatten wurde unter der Annahme geführt, dass es zwischen Anode und Kathode keine Positionsabweichung gibt (vgl. Abbildung 2-7, $F = 0$). Es kann angenommen werden, dass die Streuungen des Handhabungsgeräts sowie der Ausrichteinheit vergleichbar sind. Die Genauigkeit des Greifens kann allerdings nicht übertragen werden, da sich unverschweißte Bipolarplattenhalbschalen gegebenenfalls anders verhalten als verschweißte Bipolarplatten. Mit dem vorgestellten System kann eine Prozessfähigkeit erreicht werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Die PEM-Brennstoffzelle zeigt in ihrer Anwendung eine große Abhängigkeit von der vorhandenen Wasserstoffinfrastruktur, wodurch das Wachstum beschränkt wird. Weiterhin existieren auf dem Markt verschiedenste Hersteller, was zu einer hohen Fragmentierung führt. Für den Maschinen- und Anlagenbau ergibt sich dabei die Herausforderung, dass im Sinne der Wirtschaftlichkeit eine hohe Modularität anzustreben ist. Weiterhin herrscht zwischen dem Produzenten und dem Anlagenbauer ein Kunden- und Lieferantenverhältnis, welches in Lasten- und Pflichtenheften dokumentiert wird. Insbesondere vor diesem Hintergrund ist die Kenntnis um Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktionssystem entscheidend.

Hierzu wurden in Kapitel 2 die wesentlichen Merkmale einer PEM-Brennstoffzelle identifiziert. Anhand des vorliegenden Stands der Technik konnten kritische Merkmale in der Stapelbildung identifiziert werden. Weiterhin wurde erfasst, welche Systeme zur Handhabung, zum Greifen und zum Ausrichten von Bauteilen in der Brennstoffzellenfertigung Verwendung finden.

In Kapitel 4 wurden zunächst daraus abgeleitete Anforderungen gesammelt. Subsysteme wurden definiert und ein Gesamtsystementwurf wurde abgeleitet. Schnittstellen wurden festgelegt und eine Vorauswahl wurde getroffen.

Ein Versuchsstand zur Untersuchung des Greifprozesses wurde in Kapitel 5 vorgestellt. Mittels des Versuchsstands wurden die Handhabung der Komponenten CCM, GDL, MEA und Bipolarplatte untersucht. Zur Erreichung der Ziele der Arbeit wurden wesentliche Elemente des Qualitätsmanagements, insbesondere der Six Sigma Methodik, angewendet. Durch robuste Parametereinstellungen konnten Positionsabweichungen reduziert werden, Einflussfaktoren konnten durch eine Varianzanalyse identifiziert werden. Prozessfähigkeitsanalysen und Qualitätsregelkarten unterstützen dabei diesen Prozess.

Kern der Arbeit stellt das entwickelte Greifsystem in Kapitel 6 dar. Ein Greifer wurde konstruiert und aufgebaut. Anhand des Greifers wurden verschiedene Methoden der Positionsauswertung miteinander verglichen und eine Auswahl wurde getroffen. Wesentliches Merkmal des Systems ist die funktionsorientierte Ausrichtung der Bipolarplatte. Durch die Auswertung der Phaseninformation und Auswertung im

Subpixelbereich der Kamerabilder kann eine **hohe Genauigkeit < 10 µm** erzielt werden. Zur Einrichtung des Systems muss ausschließlich eine Kalibrierung vorgenommen und ein Bildausschnitt definiert werden. Durch den damit erreichten geringen Einrichtungsaufwand ist eine **hohe Universalität** gegeben. Dies erlaubt den Einsatz identischer Systeme für verschiedene Anwender ohne zusätzlichen Aufwand.

8.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat die Komplexität und den von Wechselwirkungen zwischen Produkt und Produktion gekennzeichneten Charakter der Brennstoffzellenproduktion verdeutlicht. Durch die Fokussierung auf funktionsrelevante Merkmale konnte die Toleranzkette wesentlich verkürzt werden. Als flächiges und unstrukturiertes Bauteil lässt sich die MEA nicht anhand funktionsrelevanter Merkmale ausrichten. Darüber hinaus sind relevante Merkmale während des Stapelprozesses nicht zu erfassen, insbesondere die Lage der CCM zwischen den beiden Gasdiffusionslagen. Daher ist es unerlässlich, ein Produktionssystem der MEA mit dem der Stapelbildung informationstechnisch zu koppeln.

Quantifizierbare Ergebnisse beruhen dabei stets auf den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bauteilen und Materialien. Anhand zahlreicher Beispiele konnte verdeutlicht werden, dass es zwischen dem Produkt und dem Produktionsprozess starke Wechselwirkungen gibt. Das in dieser Arbeit präsentierte Vorgehen kann somit für einen entwicklungsbegleitenden Qualifizierungsprozess genutzt werden. Durch die damit ermöglichte frühzeitige Identifikation wesentlicher Einflussfaktoren können Kosten minimiert und Entwicklungszeiten reduziert werden.

Im öffentlichen Stand der Technik werden Prozessstreuungen nur in geringem Ausmaß offenbart. Die Anforderung nach präziser und gleichzeitig wirtschaftlicher Produktion macht es jedoch zwingend erforderlich, dass statt einer arithmetischen Toleranzrechnung eine statistische Toleranzrechnung durchgeführt wird. Für ein geschlossenes Bild über die Brennstoffzellenproduktion hinaus sind daher weitere Prozessstreuungen zu ermitteln. Dazu gehört die Herstellung der MEA, vorrangig der Genauigkeiten der Zuschnitte, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht wurde. Weiterhin kann eine stärkere Berücksichtigung der Herstellung der Bipolarplatte erfolgen, inklusive des Fügens der Bipolarplatte.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Aufbau und Funktion einer Brennstoffzelle in verschiedenen Skalen	6
Abbildung 2-2 Bipolarplatte mit charakteristischen Konstruktionsmerkmalen	7
Abbildung 2-3 Ausschnitt einer 7-Lagen-MEA, darunter Bipolarplatte	10
Abbildung 2-4 Dichtungsbereich in verschiedenen Ausführungen	11
Abbildung 2-5 Prozesskette eines Stacks mit metallischen Bipolarplatten	13
Abbildung 2-6 schematische Prozessfolge 5-Lagen-MEA	20
Abbildung 2-7 Querschnitt mit verschiedenen geometrischen Abweichungen A-G	26
Abbildung 2-8 Mögliche Umsetzung teilflächig beschichteter CCM	27
Abbildung 2-9 Elementarfunktionen im Stand der Technik	33
Abbildung 2-10 schematische Darstellung des z-Faltens	44
Abbildung 3-1 Systemgrenzen der Betrachtung	47
Abbildung 3-2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	51
Abbildung 4-1 Aufbau des Kapitels 4	52
Abbildung 4-2 Brennstoffzellenstacking in Anlehnung an VDI 2860	54
Abbildung 4-3 Toleranzketten und Prozesszeitbetrachtung Variante A	56
Abbildung 4-4 Toleranzketten und Prozesszeitbetrachtung Variante B	57
Abbildung 4-5 Toleranzketten und Prozesszeitbetrachtung Variante C	57
Abbildung 4-6 Wiederholgenauigkeit und Zykluszeit versch. Manipulatoren	63
Abbildung 4-7 geplante Architektur und Teilmodule	64
Abbildung 5-1 Greifer im Teilquerschnitt	67
Abbildung 5-2 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Genauigkeiten	68
Abbildung 5-3 Funktionsdiagramm der Versuchsdurchführung	68
Abbildung 5-4 Greifkraft in Abhängigkeit von Versorgungsdruck und Abstand	73
Abbildung 5-5 Gemessene Flächenkraft bei 5 bar mit einem Abstand von 1 mm	74
Abbildung 5-6 Tangentialkraft einer MEA	75

Abbildung 5-7 Wiederholversuche (CCM), kein Abstand, kein Vakuumtisch	77
Abbildung 5-8 Einfluss der Welligkeit auf den Greifvorgang	78
Abbildung 5-9 Wiederholversuche (CCM), kein Abstand, mit Vakuumtisch	80
Abbildung 5-10 Verformung einer CCM bei veränderter Luftfeuchte	82
Abbildung 5-11 verwendete GDL mit Referenzmarkern und Bauteilzentrum	83
Abbildung 5-12 Ergebnisse der Wiederholversuche (GDL)	84
Abbildung 5-13 verwendete MEA mit Referenzmarkern und Bauteilzentrum	86
Abbildung 5-14 z-Abweichung einer MEA bei verschiedenen Luftfeuchten	87
Abbildung 5-15 Ablagegenauigkeit einer MEA, RH = 70 %	89
Abbildung 5-16 Verwendete Bipolarplatte mit Referenzmarkern	94
Abbildung 5-17 Positionsabweichungen bei mehrmaligem Greifen einer BPP	95
Abbildung 5-18 Standardabweichung der z-Lage einer BPP	97
Abbildung 6-1 Schnittdarstellung des Greifers	102
Abbildung 6-2 Kamerabilder ohne Vorverarbeitung	104
Abbildung 6-3 Bipolarplatte, überlagert mit zugeordnetem Kamerabild	106
Abbildung 6-4 Versuchsaufbau zur Qualifizierung des Auswertealgorithmus	107
Abbildung 6-5 schrittweise Darstellung der Phase Cross Correlation	110
Abbildung 6-6 Vergleich verschiedener Auswertealgorithmen	111
Abbildung 6-7 Kreuzkorrelation mit erfassten Maxima	113
Abbildung 6-8 Beispiel der Anwendung und Auswertung des Template Matching	114
Abbildung 6-9 Zwischen zwei Bildern erkannte und zugeordnete Punkte	115
Abbildung 6-10 Einfluss des Interpolationsfaktors auf die Messgenauigkeit	116
Abbildung 6-11 Berechnungsschritte der Auswertung	119
Abbildung 6-12 Versuchsaufbau zur Validierung	121
Abbildung 6-13 wesentliche Schritte der Versuchsdurchführung	122
Abbildung 6-14 Wiederholgenauigkeit des Roboters an drei Messpunkten	125
Abbildung 6-15 generierte Zufallswerte der Ablage	126

Abbildung 6-16 absolute Ablageposition der Bipolarplatte	127
Abbildung 6-17 benachbarte Ablageposition der Bipolarplatte	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Prozesszeiten des Spritzgießens einer Seal-on Plate Dichtung	18
Tabelle 2-2 Umsetzungsformen zum Ausrichten im Stand der Technik	35
Tabelle 2-3 Umsetzungsformen zum Spannen und Halten	39
Tabelle 2-4 Umsetzungsformen zum Weitergeben der Bauteile	40
Tabelle 3-1 Gesamtsystem, Teilsysteme und Teilziele	49
Tabelle 5-1 erhobene statistische Daten	70
Tabelle 5-2 Werte der Varianzzerlegung nach (Klein 2014)	71
Tabelle 5-3 Streuungen der Ablagegenauigkeit (CCM)	80
Tabelle 5-4 Dehnung Gore Primea A510.1/M765.08/C586.4	82
Tabelle 5-5 Streuung der Ablagegenauigkeit (GDL)	85
Tabelle 5-6 Varianzanalyse (GDL, $a_{\text{auf}} = 0 \text{ mm}$, mit/ohne Vakuumtisch)	85
Tabelle 5-7 Varianzanalyse (GDL, $a_{\text{auf}} = 0 \text{ mm} - 5 \text{ mm}$, mit Vakuumtisch)	85
Tabelle 5-8 Statistische Auswertung der Ablagegenauigkeit (MEA, RH = 70 %)	88
Tabelle 5-9 Varianzanalyse der Greifabstände (MEA, RH = 70 %)	90
Tabelle 5-10 Varianzanalyse (MEA, RH = 60 - 65 - 70 - 75 %)	91
Tabelle 5-11 Varianzanalyse (MEA, RH = 65-70 %, Abstände 0 - 2,5 mm)	92
Tabelle 5-12 Varianzanalyse (MEA, RH = 65-70 %, Abstände 0 - 2,5 – 5,0 mm)	92
Tabelle 5-13 Statistische Auswertung der Ablagegenauigkeit (BPP)	96
Tabelle 5-14 Varianzanalyse der Greifabstände (BPP)	97
Tabelle 5-15 Varianzanalyse versch. BPP, kein Abstand	98
Tabelle 5-16 Varianzanalyse versch. BPP, 1 mm Abstand	99
Tabelle 6-1 Technische Spezifikation der verwendeten Kamera	103
Tabelle 6-2 Technische Spezifikation des verwendeten Objektivs	104
Tabelle 6-3 ermittelte geometrische Werte der Kameras	106
Tabelle 6-4 Korrekturparameter zur Positionsbestimmung	107

Tabelle 6-5 Anteil der Fehler <0,1 mm, je Verfahren	112
Tabelle 6-6 Einfluss der Interpolation auf die Messgenauigkeit	117
Tabelle 6-7 Standardabweichungen verschiedener Messpunkte am Greifer	125
Tabelle 6-8 Standardabweichungen, BPP, Wiederholgenauigkeit	127
Tabelle 6-9 benachbarte Genauigkeit und Gesamtgenauigkeit, gemessen	129
Tabelle 7-1 Ablagegenauigkeiten versch. Bauteile einer Brennstoffzelle	132
Tabelle 7-2 Bestimmte Einflüsse auf die Genauigkeit des Stapelprozesses	133

Literaturverzeichnis

(Akimoto 2008)

Akimoto, N. (2008) "Brennstoffzelle, Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung einer Brennstoffzelle", Offenlegungsschrift der internationalen Anmeldung DE112006000900T5, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE112006000900T5>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Andreas-Schott & Ritter 2014)

Andreas-Schott, B. & Ritter, M. (2014) "Verfahren zur Montage eines Brennstoffzellenstapels sowie Positionierzvorrichtung zur Durchführung des Verfahrens", Offenlegungsschrift DE102013210545A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102013210545A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Arcella, Merlo, & Ghielmi 2011)

Arcella, V.; Merlo, L. & Ghielmi, A. (2011), Proton exchange membranes for fuel cells in *Advanced Membrane Science and Technology for Sustainable Energy and Environmental Applications*, Hrsg. Basile, A. & Nunes, S. P., Woodhead Publishing India Private Limited, Neu Delhi, Indien, ISBN: 9781845699697

(Arell, Flink & Lydhig 2021)

Arell, L. G.; Flink, J & Lydhig, T. (2021) "Manufacturing arrangement and method for a fuel cell stack", Offenlegungsschrift WO2021206615A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=WO2021206615A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Arico 2016)

Arico, A. S. (2016), Filler in Membranes in *Encyclopedia of Membranes*, Hrsg. Drioli, E. & Giorno, L., Springer-Verlag, Berlin, ISBN: 9783662443255

(Artibise & Farrington 2006)

Artibise, R. & Farrington, S. (2006) "Membrane electrode assembly with integrated seal", Patentschrift US7070876B2 , erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US7070876B2> , zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Astrom et al. 2011)

Astrom, S.; Joelsson, T.; Ljungcrantz, H. & Walivaara, B. (2011) "Electrode with a coating, method in production thereof and use of material", Offenlegungsschrift US20110033784A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20110033784A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Bach 2015)

Bach, S. M. (2015) Neue Charakterisierungsmethoden für die Gasdiffusionslage in PEM-Brennstoffzellen vor dem Hintergrund produktionsprozessbedingter Materialschwankungen, Dissertation, Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Forschungszentrum Jülich, ISBN 9783958060883

(Bacher, Oettinger & Langer 2002)

Bacher, J., Oettinger, O. & Langer, W. (2002) „Imprägnierter Körper aus expandiertem Graphit“, Offenlegungsschrift DE10060839A1, erhältlich über <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE10060839A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Baik et al. 2012)

Baik, K. D.; Hong, B. K.; Jan, K. & Kim, M. S. (2021) Correlation between anisotropic bending stiffness of GDL and land/channel width ratio of polymer electrolyte membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, S. 11921-11933, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.120

(Banan, Zu & Bazylak 2015)

Banan, R.; Zu, J. & Bazylak, A. (2015) Humidity and Temperature Cycling Effects on Cracks and Delaminations in PEMFCs, *Fuel Cells*, 15(2), S. 327-336, DOI: 10.1002/fuce.201400118

(Banas et al. 2018)

Banas, C. J.; Uddin, A.; Park, J.; Bonville, L. J. & Pasaogullari, U. (2018) Thinning of Cathode Catalyst Layer in Polymer Electrolyte Fuel Cells Due to Foreign Cation contamination, *Journal of The Electrochemical Society*, 165 (6), DOI: 10.1149/2.0021806jes

(Bayer, Stahl & Kraft 2019)

Bayer, A.; Stahl, P. & Kraft, J. (2019) "Bipolarplatte für eine elektrochemische Vorrichtung", Offenlegungsschrift DE102017115873A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102017115873A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Blunk et al. 2005)

Blunk, R. H.; Abd Elhamif, M. H.; Lisi, D. J.; Mikhail, Y. M. & Budinski, M. K. (2005) "Adhesive bonds for metallic bipolar plates", Patentschrift US6942941B2, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US6942941B2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(BMWi 2020)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2020) Die nationale Wasserstoffstrategie, verfügbar unter
https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt abgerufen: 07.08.2023

(Bobka, Gabriel & Dröder 2020)

Bobka, P.; Gabriel, F. & Dröder, K. (2020) Fast and precise pick and place stacking of limp fuel cell components supported by artificial neural networks, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 69, S. 1-4, DOI: 10.1016/j.cirp.2020.04.103

(Brützel et al. 2021)

Brützel, O.; Gonzales Di Miele, R. I.; Overbeck, L.; May, M.C. & Lanza, G. (2021) Modeling of a Modular Discrete Event Simulation for Fuel Cell Assembly within a Factory, Fuel Cell Conference FC3, Chemnitz, 31.05.-01.06.2022, TU Chemnitz

(Butsch 2012)

Butsch, H. (2012), "Entwicklung neuartiger Gasdiffusionslagen (GDL) und von Methoden zu deren Charakterisierung", Dissertation, TU Darmstadt, verfügbar unter <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3337>

(Buttermann 2023)

Buttermann, H. G. (Hrsg.) Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2022, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/06/AGEB_Jahresbericht2022_20230615_dt.pdf, zuletzt abgerufen: 25.07.2023

(Chen et al. 2016)

Chen, J.; Liu, H.; Huang, Y. & Yin, Z. (2016) High-rate roll-to-roll stack and lamination of multilayer structured membrane electrode assembly, *Journal of Manufacturing Processes*, 26, S. 175-182, DOI: j.jmapro.2016.06.022

(Chen et al. 2022)

Chen, Y.; Singh, Y.; Ramani, D.; Orfino, F. P.; Dutta, M. & Kjeang, E. (2022) 4D imaging of chemo-mechanical membrane degradation in polymer electrolyte fuel cells – Part 1: Understanding and evading edge failures, *Journal of Power sources*, 520, DOI: j.jpowsour.2021.230674

(Cho & Lee 2018)

Cho, S. H. & Lee, N. G. (2018) "Vorrichtung und verfahren zur zuführung von bauteilen des brennstoffzellenstapels", Offenlegungsschrift DE102016217067A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102016217067A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Claude et al. 2016)

Claude, E.; Bosquet, R.; Platen, G. & Roussel, C. (2016) "Conducting plates for fuel cell elements", Patentschrift US9368807B2, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US9368807B2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Cunningham, Huang & Baird 2013)

Cunningham, B. D.; Huang, J. & Baird, D. G. (2013) Review of materials and processing methods used in the production of bipolar plates for fuel cells, *International Materials Reviews*, 52(1), S. 1-13, DOI: 10.1179/174328006X102556

(Dang 2022)

Dang, W. (2022) "Brennstoffzellenstapel und Verfahren zum Aufstapeln von plattenförmigen Komponenten", Offenlegungsschrift DE102021203962A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102021203962A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Defraneceski 2020)

Defranceski, A. (2020), Bewertung elektroadhäsiver Greifer für die industrielle Handhabung von Blechteilen, Dissertation, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, ISBN: 9783839616574

(Demmel & Hoffmann 2015)

Demmel, P. & Hoffmann, H (2015) Feinschneiden in Blechumformung – Verfahren, Werkzeuge und Maschinen Hrsg. Siegert, K. ISBN: 978-3-540-68418-3, Springer, Berlin

(Deutsch et al. 2016)

Deutsch, J.; Horinek, V.; Pretzel, L.; Riede, N.; Sänger, T.; Zimmerer, K. & Zöller, C. (2016) "Verfahren zum Herstellen eines Brennstoffzellenstapels", Offenlegungsschrift DE102016001193A1 , erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102016001193A1> , zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(DIN 2019)

DIN EN ISO 286-1:2019-09 (2019), Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen (ISO 286-1:2010 + Cor 1:2013); Deutsche Fassung EN ISO 286-1:2010 + AC:2013, Beuth-Verlag, Berlin, DOI: 10.31030/3056514

(DIN 2021)

DIN EN 62282-2-100 (VDE 0130-2-100) (2021), Brennstoffzellentechnologien – Teil 2 – 100: Brennstoffzellenmodule . Sicherheit (IEC 92282-2-100:2020); Deutsche Fassung EN IEC 92282-2-100:2020, VDE Verlag, verfügbar unter www.normenbibliothek.de, zuletzt abgerufen 09.01.2023

(Dreier 2018)

Dreier, G. (2018) "Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen eines Brennstoffzellen-Stacks", Offenlegungsschrift DE102017000176A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102017000176A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Dylla et al. 2022)

Dylla, N.; Jansen, J.; Grotehusmann, R. & Gronemann, J. (2022) "Vorrichtung und Verfahren zum Übertragen einer Membran", Offenlegungsschrift DE102020214263A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102020214263A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Farrington 2015)

Farrington, S. (2015) "Ausrichtungsbestandteil und Verfahren zum Ausrichten in Brennstoffzellenstapeln", Offenlegungsschrift DE102014015219A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102014015219A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Fischmann 2014)

Fischmann, C. (2014), Verfahren zur Bewertung von Greifern für Photovoltaik-Wafer, Dissertation, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart, Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, ISBN: 9783839606667

(Förster 2016)

Förster, F. (2016), Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte, Dissertation, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), ser. Schriftenreihe des wbk Institut für Produktionstechnik, SHAKER Verlag, Düren, ISBN: 9783844050912

(Fröhlich et al. 2018)

Fröhlich, A.; Leithoff, R.; von Boeselager, C.; Dröder, K. & Dietrich, F. (2018), "Investigation of particulate emissions during handling of electrodes in lithium-ion battery assembly", *Procedia CIRP*, 78, S. 341-346, 6th CIRP Global Web conference, 23.-25. October 2018, DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.322.

(Fröhlich, Masuch, & Dröder 2022)

Fröhlich, A.; Masuch, S. & Dröder, K. (2022), „Design of an Automated Assembly Station for Process Development of All-Solid-State Battery Cell Assembly“ in *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*, Hrsg. Schüppstuhl, T.; Tracht, K. & Raatz, A., Springer Nature Switzerland, Cham, S. 51-62, DOI: 10.1007/978-3-030-74032-0_5

(Fröhlich 2014)

Fröhlich, K. (2014) Der Decal-Prozess zur Herstellung katalysatorbeschichteter Membrane für PEM-Brennstoffzellen, Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für angewandte Materialien, Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, ISBN: 9783731503347

(Fukaya 2010)

Fukaya, Y. (2010) "Herstellungsverfahren einer Brennstoffzelle, Brennstoffzellenseparator und Transportsystem desselben.", Offenlegungsschrift der internationalen Anmeldung DE112008000654T5, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE112008000654T5>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Furukawa & Usui 2009)

Furukawa, R. & Usui, A. (2009) "Fuel cell producing method and apparatus", Patentschrift US7615302B2, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US7615302B2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Gallagher 2015)

Gallagher, E. (2015) "Bipolarplatte, Brennstoffzelle, Stapel aus Brennstoffzellen und Vorrichtung zur Ausrichtung von Bipolarplatten", Offenlegungsschrift DE102014208948A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102014208948A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Gaugler et al. 2004)

Gaugler, B.; Höhe, K.; Ströbel, R. & Tasch, D. (2004) "Bipolarplatte und Verfahren zu deren Herstellung sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens", Patentschrift DE10221951B4, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE10221951B4>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Gaugler et al. 2009)

Gaugler, B.; Schleier, C.; Glück, R.; Kunz, C. & Scherer, J. (2009) "Elektrochemisches System und Bipolarplatte", Patentschrift DE102007048184B3, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102007048184B3>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Gaugler & Kunz 2011)

Gaugler, B. & Kunz, C. (2011) "Bipolarplatte sowie Verfahren zu deren Herstellung", Patentschrift DE102009036039B4, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102009036039B4>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Gaugler et al. 2021)

Gaugler, B.; Glück, R. Speidel, A. & Stöhr, T. (2021), The metallic Bipolar Plate – Efficient Solution for Fuel Cell Stacks, MTZ worldwide, 82, S. 52-57, DOI: 10.1007/s38313-021-0674-7

(Gehring 2022)

Gehring, H. (2022) "Bipolarplatte mit einer Positionierungsöffnung sowie Verfahren zu deren Herstellung", Offenlegungsschrift DE102022202946A1, erhältlich über:

<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE10202202946A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Gottschalk, Landvogt & Gehrold 2022)

Gottschalk. A.; Landvogt, R. & Gehrold, A. (2022) "Verfahren zur Herstellung einer Membranelektrodenanordnung", Offenlegungsschrift DE102020214491A1, erhältlich über:

<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102020214491A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Götz 1991)

Götz, R. (1991), Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile, Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-662-10128-5.

(Grandjean 2018)

Grandjean, A. (2018) "Method for producing a fuel cell with a screen-printed seal", Offenlegungsschrift US20180375117A1, erhältlich über:

<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20180375117A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Hackenberg, Diessner & Betzitz 2021)

Hackenberg, J.; Diessner, C. & Betzitz, T. (2021) "Folie für ein Foliensystem, Folien-MEA System mit Foliensystem, Brennstoffzellenstapel mit Folien-MEA System sowie Verfahren zum Herstellen eines Folien-MEA Systems", Offenlegungsschrift DE102019220599A1, erhältlich über:

<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102019220599A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Haluschka et al. 2022)

Haluschka, C.; Maier, E.; Yildirim, A. R.; Gerlach, M.; Ringel, A.; Ringk, A.; Knorr, F. A.; Muller, A.; Andersson, J.; Holmberg, M.; Munthe, S.; Andersch, S.; Dziallas, H. & Suchsland, J.-P. (2022) "Verfahren zum Befestigen eines Gaskets mit einer Bipolarplatte", Offenlegungsschrift DE102020133959A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102020133959A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Han et al. 2010A)

Han, K. I.; Lee, K. J.; Kim, S. H. Hong, B. K. & Ahn, B. K. (2010) "Method for Bonding MEA and GDL of fuel cell stacks", Offenlegungsschrift US20100000679A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20100000679A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Han et al. 2010B)

Han, K; Hong, B. K.; Kim, s. H.; Ahn, B. K. & Lim, T. W. (2010) Influence of anisotropic bending stiffness of gas diffusion layers on the electrochemical performances of polymer electrolyte membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, S. 12317-12328, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.061

(Hans et al. 2016)

Hans, B.; Herrmann, M.; Krais, H.; Manetsberger, K.; Opinc, C. & Weinhardt, W. (2016) "Verfahren zur Montage eines Brennstoffzellenstapels und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens", Offenlegungsschrift DE102015016779A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102015016779A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Hong & Han 2011)

Hong, B. K. & Han, K. I. (2011) "Gasdiffusionsschicht für Brennstoffzellenanwendungen", Offenlegungsschrift DE102010002392A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102010002392A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Hong et al. 2011)

Hong, B. K.; Han, K. I.; Park, J. Y; Jeong, B. H. & Ahn, S. Y. (2011) "Vorrichtung und Verfahren für eine zerstörungsfreie Messung der Biegesteifigkeit von Brennstoffzellen", Offenlegungsschrift DE102010042443A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102010042443A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Hong et al. 2017)

Hong, B. K.; Jeong, B. H.; Ko, S. K.; Bowers, S.; Lee, H. J. & Choi, Y. G. (2017) "Integrated fluorine gasket manufactured by injection molding for hydrogen fuel cells", Patentschrift US9640807B2, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US9640807B2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Hoppe 2021)

Hoppe, E. (2021) Kompressionseigenschaften einer Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle, Dissertation, Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Forschungszentrum Jülich, ISBN: 9783958065499

(Hoppe et al. 2021)

Hoppe, E.; Janßen, H. Müller, M. & Lehnert, W. (2021) The impact of flow field plate misalignment on the gas diffusion layer intrusion and performance of a high-temperature polymer electrolyte fuel cell, *Journal of Power Sources*, 501, S. 1-98, DOI: j.jpowsour.2021.230036

(Horinek et al. 2020)

Horinek, V.; Deutsch, J.; Pretzel, L. & Sänger, T. (2020) "Verfahren zum Stapeln eines PEM-Brennstoffzellenstapels", Offenlegungsschrift DE102019000155A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102019000155A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Horiuchi & Nakamura 2022)

Horiuchi, A. & Nakamura, N. (2022) "One-pack type adhesive and fuel cell separator", Patentschrift US11254798B2, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US11254798B2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Hornig, Will & Schurek 2021)

Hornig, R.; Will, P. & Schurek, P. (2021) "Hybridelastomermaterial", Offenlegungsschrift DE102020113737A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102020113737A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Hu et al. 2014)

Hu, Q.; Zhang, D.; Fu, H. & Huang, K. (2014), Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell-Numerical simulation and experiments, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, S. 13770-13776, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.01.201

(Hwang & Lee 2017)

Hwang, S. H. & Lee, S. H. (2017) "GDL Schneidsystem für Brennstoffzellen und Schneidverfahren", Offenlegungsschrift DE102016222077A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102016222077A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Inoue 2006)

Inoue, T. (2006) "Fuel cell separator", Offenlegungsschrift JP2006066260A, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=JP2006066260A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(ISO 2021)

ISO (2021) (Hrsg.) ISO 8373:2021-11 Robotics – Vocabulary, Beuth-Verlag, Berlin

(Itoh, Abe & Ohnuma 2008)

Itoh, Y.; Abe, N. & Ohnuma, S. (2008) "Herstellungsverfahren und -System für Brennstoffzellen", Offenlegungsschrift der internationalen Anmeldung DE112004000776T5, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE112004000776T5>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(James et al. 2018)

James, B. D.; Huya-Kouadio, J. M.; Houchins, C. & DeSantis, D. A. (2018) Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2018 Update, Strategic Analysis Inc., Arlington, Vereinigte Staaten, erhältlich über: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/mass-production-cost-estimation-direct-h2-pem-fuel-cell-systems-3>, zuletzt abgerufen 09.01.2023

(Janßen et al. 2018)

Janßen, H.; Edelmann, A.; Mildebrath, T.; Müller, P.; Lehnert, W. & Stolten, D. (2018) Design and experimental validation of an FT-PEFC stack with metallic BPP, *International Journal of Hydrogen Energy*, S. 18488-18497, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.058

(Jayakumar 2018)

Jayakumar, A. (2018) An Assessment on Additive Manufacturing Technique to Fabricate Integral PEM Fuel Cell/Electrolyser Component, MATEC Web of Conferences, 3rd International Conference on Design, Analysis, Manufacturing and Simulation (ICDAMS 2018), 06.04.2018 – 07.04.2018, Chennai, Indien, DOI: 10.1051/matecconf/201817204005

(Jeong & Yoo 2021)

Jeong, B. H. & Yoo, H. (2021) "Elastomeric cell frame for fuel cell, manufacturing method of the same and unit cell using the same", Offenlegungsschrift US20210036341A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20210036341A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Ju & Jang 2016A)

Ju, H. K. & Jang, Y. (2016) "Vorrichtung zum automatischen Stapeln eines Brennstoffzellenstapels", Offenlegungsschrift DE102015220399A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102015220399A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Ju & Jang 2016B)

Ju, H. K. & Jang, Y. (2016) "Vorrichtung zum schnellen Stapeln eines Brennstoffzellenstapels", Offenlegungsschrift DE102015218117A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102015218117A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Kawai 2010)

Kawai, K. (2010) "Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung eines Brennstoffzellen-Elektrodenmaterialverbunds und Brennstoffzelle", Offenlegungsschrift der internationalen Anmeldung DE112008001580T5, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE112008001580T5>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Kemmerich 2018)

Kemmerich, J. (2018) Gesamtvorhaben HyMotion5-Brennstoffzellenstapel Teilvorhaben Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG Entwicklung und Herstellung von Dichtungen für Brennstoffzellenstapel, Öffentlicher Schlussbericht, Förderkennzeichen 03ET2058F, 01.04.2015 - 31.12.2017, DOI: 10.2314/GBV:1046544713

(Kim 2010)

Kim, S. H. (2010) "Automatic stacking system for fuel cell stack", Offenlegungsschrift KR20090081713A, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=KR20090081713A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Kim et al. 2021)

Kim, Y. M.; Roh, B. W.; Park, S. J.; Lee, K. S. & Yu, H. Y. "Membrane electrode assembly for fuel cells and method of manufacturing the membrane electrode assembly for fuel cells", erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20210057765A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Kim, Kim & Jeon 2012)

Kim, K. H.; Kim, K. J. & Jeon, Y. T. (2012) "Apparatus for manufacturing fuel cell having membrane electrode assembly improved quality by adjusting alignment of gas diffusion layer and the method for manufacturing the same", Offenlegungsschrift KR20120047725A, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=KR2012047725A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Kim, Kim & Jeon 2013A)

Kim, G. H.; Kim, K. J. & Jeon, Y. T. (2013) "Apparatus for manufacturing fuel cell having membrane electrode assembly improved quality by adjusting alignment of manifold position and the method for manufacturing the same", Offenlegungsschrift KR20120090361A, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=KR2012090361A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Kim, Kim & Jeon 2013B)

Kim, G. H.; Kim, K. J. & Jeon, Y. T. (2013) "Apparatus for detecting aligned position of membrane electrode assembly and gas diffusion layer and method thereof", Patentschrift KR101251229B1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=KR101251229B1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Kim & Lee 2017)

Kim, Y.G. & Lee, S.H. (2017) "Brennstoffzellenkomponente und Herstellvorrichtung derselben", Offenlegungsschrift DE102016224852A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102016224852A1>, zuletzt abgerufen: 26.06.2023

(Klee 2022)

Klee, B. (2022), Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen, Dissertation, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), ser. Schriftenreihe des wbk Institut für Produktionstechnik, Band 253, SHAKER Verlag, Düren, ISBN: 978-3-8440-8628-7

(Kleemann, Finsterwalder & Tillmetz 2009)

Kleemann, J.; Finsterwalder, F. & Tillmetz, W. (2009) Characterisation of mechanical behaviour and coupled electrical properties of polymer electrolyte membrane fuel cell gas diffusion layers, *Journal of Power Sources*, 190(1), S. 92-102, DOI:10.1016/j.jpowsour.2008.09.026

(Klein 2021)

Klein, B. (2021) Versuchsplanung – Design of Experiments. Einführung in die Taguchi und Shainin-Methodik, De Gruyter, Oldenburg, ISBN: 9783110724516

(Klocke 2018)

Klocke, F. (2018) Fertigungsverfahren 4 – Umformen, Springer Vieweg, Berlin, ISBN: 978-3-662-54714-4

(Kolbe & Hellwig 2018)

Kolbe, M. & Hellwig, W. (2018), Spanlose Fertigung Stanzen, Stanzteile – Feinstanzteile – Hochleistungsstanzwerkzeuge – Hochleistungs- und Feinstanzpressen, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-20024-4

(Königer & Jakobs 2022)

Königer, W. & Jakobs, A. (2022) „Verfahren und Vorrichtung zum Bilden eines Stapels von flächigen Elementen für einen Energiespeicher oder eine Brennstoffzelle“, Offenlegungsschrift DE102021001854A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102021001854A1>, zuletzt abgerufen: 25.06.2023

(Konno et al. 2015)

Konno, N.; Mizuno, S.; Nakaji, H. & Ishikawa, Y. (2015) Development of Compact and High-Performance Fuel Cell Stack, *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 4(1), S. 123-129, DOI: 10.2307/26169071

(Konold, Muminovic & Werheim 2008)

Konold, P.; Muminovic, A & Wehrheim, M. (2008), Assembly of Fuel Cells and Stacks with Robots in Research and Education in *Robotics – EUROBOT 2008*, Hrsg. Gottscheber, A., Enderle, S. & Obdrzalek, D., Springer-Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-642-03557-9

(Kraft, Morcos & Götz 2016)

Kraft, J.; Morcos, M. & Götz, M. (2016) "Verfahren zum Verspannen einer elektrochemischen Vorrichtung und elektrochemische Vorrichtung", Offenlegungsschrift DE102014114201A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102014114201A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Kreitmeier, Wokaun & Büchi 2012)

Kreitmeier, S.; Wokaun, A. & Büchi, F. N. (2012) Local Catalyst Support Degredation during Polymer Elektrolyte Fuel Cell Start-up and Shutdown, *Journal of the Electrochemical Society*, 159, S. 787-793, DOI: 10.1149/2.019212jes

(Kuolt & Müller 2014)

Kuolt, H. & Müller, M. (2014) „Flächensauggreifer“, Patentschrift DE102012215798B4, erhältlich über <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102012215798B4>, zuletzt abgerufen: 27.06.2023

(Kuramochi et al. 2005)

Kuramochi, T.; Katsu, M.; Eguchi, K.; Muto, Y.; Komata, M. Iwamoto, M. & Kanefusa, H. (2005) "Manufacturing method of electrolytic film and polymer electrolyte fuel cell", Offenlegungsschrift JP2005183182A, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=JP2005183182A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Kurihara 2021)

Kurihara, T. (2021) "Fuel cell stack and method of manufacturing fuel cell stack", Patentschrift US11094946B2, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US11094946B2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Lee 2010)

Lee, S. K. (2010) "Automatic stacking system for fuel cell stack and method thereof", Offenlegungsschrift KR20090108477A, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=KR20090108477A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Lee, Park & Cho 2016)

Lee, N. G.; Park, J. O. & Cho, S. H. (2016) "Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen eines Brennstoffzellenstapels", Offenlegungsschrift DE102014224615A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102014224615A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Liang et al. 2017)

Liang, P.; Qiu, D.; Peng, L.; Yi, P.; Lai, x. & Ni, J. (2017) Structure failure of the sealing in the assembly process for proton exchange membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, S. 10217-10227, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.026

(Lim, Heo & Kim 2014)

Lim, J. W.; Heo, J. M. & Kim, J. H. (2014) "Separator and method for manufacturing the same", Patentschrift KR101425561B1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=KR101425561B1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Liu, Peng & Lai 2010)

Liu, D.; Peng, L. & Lai, X. (2010) Effect of assembly error of bipolar plate on the contact pressure distribution and stress failure of membrane electrode assembly in proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 195, S. 4213-4221, DOI: [10.1016/j.jpowsour.2009.12.113](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.113)

(Liu & Sung 2012)

Liu, C.-Y. & Sung (2012), A review of the performance and analysis of proton exchange membrane fuel cell membrane electrode assemblies, *Journal of Power Sources*, 220, S 348-353, DOI: [10.1016/j.jpowsour.2012.07.090](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.090)

(Liu et al. 2013)

Liu, W.; Suzuki, T.; Mao, H. & Schmiedel, T. (2012), Development of Thin, Reinforced PEMFC Membranes through Understanding of Structure-Property-Performance Relationships, *ECS Transactions*, 50(2), S. 51-64, DOI: [10.1149/05002.0051ecst](https://doi.org/10.1149/05002.0051ecst)

(Liu et al. 2020)

Liu, W.; Qiu, D.; Peng, L.; Yi, P. & Lai, X. (2020) Mechanical degradation of proton exchange membrane during assembly and running processes in proton exchange membrane fuel cells with metallic bipolar plates, *International Journal of Energy Research*, 44, S. 8622-8634, DOI: [10.1002/er.5550](https://doi.org/10.1002/er.5550)

(Lu et al. 2011)

Lu, W.; Kim, C.; Karlsson, A. M.; Cross, J. C. & Santare, M. H. (2011) Effect of gas diffusion layer modulus and land-groove geometry on membrane stresses in proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 196, S. 4646-4654, DOI: [10.1016/j.jpowsour.2011.01.028](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.028)

(Lyo et al. 2011)

Lyo, I. W.; An, J. U.; Ahn, S. G.; Nam, Y. M.; Yang, Y. C., Kim, S. H. & Chin, S. M. (2011) "Metallic bipolar plate for fuel cell and method for forming surface layer of the same", Patentschrift US7914948B2 , erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US7914948B2> , zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Mayer & Fleischer 2021)

Mayer, D. & Fleischer, J. (2021) Concept for modelling the influence of electrode corrugation after calendering on stacking accuracy in battery cell production, *54th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, virtual conference, 22.09-24.09.2021, Procedia CIRP 104, S. 744-749, DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.125

(Ma et al. 2022)

Ma, L.; Zimmerer, N.; Schäfer, J.; Quarz, P.; Heckmann, T.; Scharfer, P.; Schabel, W. & Fleischer, J. (2022), Investigation on a micro-environment concept for MEA production process supported by numerical simulations, *Fuel Cell Conference FC3*, Chemnitz, 31.05.-01.06.2022, TU Chemnitz

(Maier 2021)

Maier, E. (2021) "Vorrichtung und Verfahren zum Montieren eines elektrochemischen Zellenstapels", Offenlegungsschrift DE102020202058A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE1020202058A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Meuser & von Unwerth 2021)

Meuser, C. & von Unwerth, T. (2021), „Einfluss verschiedener Füge- und Klebeverfahren auf den Innenwiderstand von metallischen Bipolarplatten“, *Fuel Cell Conference FC3*, Chemnitz, 31.05.-01.06.2022, TU Chemnitz

(Mitsushi & Atsushi 2006)

Mitsushi, T. & Atsushi, M. (2006) "Fuel cell", Offenlegungsschrift JP2006221897A , erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=JP2006221897A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Mohr 2012)

Mohr, P. (2018) "Optimierung von Brennstoffzellen-Bipolarplatten für die automobile Anwendung", Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Universität Duisburg-Essen, ISBN: 9781392852354

(Moteki 2020)

Moteki, K. (2020) "Fördervorrichtung für einen separator für eine brennstoffzelle", Offenlegungsschrift DE102019124925A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102019124925A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Müller et al. 2022)

Müller, M.-V.; Giorgio, M.; Hausmann, P.; Kinlechner, L.; Heinzel, A. & Schwämmlein, J. (2022), Investigation of the effect of carbon post- vs pre-coated metallic bipolar plates for PEMFCs – start-up and shut-down, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, S. 8532-8548, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.179

(Munthe 2021A)

Munthe, S. (2021) "Membrane electrode assembly, fuel cell stack with membrane electrode assembly and alignment tool for fuel cell stack", Offenlegungsschrift US20210249669A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20210249669A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Munthe 2021B)

Munthe, S. (2021) "Manufacturing arrangement for a fuel cell stack and method for manufacturing a fuel cell stack", Offenlegungsschrift US20210249680A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20210249680A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Nakamura 2020)

Nakamura, H. (2020) "Welding device of separator for fuel battery", Offenlegungsschrift JP2020127943A, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=JP2020127943A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Noh 2019)

Noh, Y. W. (2019) "Fuel cell stack and the manufacturing method", Offenlegungsschrift KR20190135293A, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=KR20190135293A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Nonoyama 2019)

Nonoyama, N. (2019) "Brennstoffzelle mit Dichtungselement und Verfahren zur Herstellung einer Brennstoffzelle mit Dichtungselement", Patentschrift DE102017101958B4, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102017101958B4>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Norley 2017)

Norley, J. (2017) Graphite-Based Bipolar Plates for PEM Motive Fuel Cell Applications, DOE Bipolar Plates Workshop, 14.02.2017, verfügbar unter: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/fcto_bipolar_plates_wkshp_norley.pdf, zuletzt geprüft: 03.01.2023

(Park & Chi 2010)

Park, J. O. & Chi, I. J. (2010) "Stack assembling moving machine for fuel cell", Offenlegungsschrift KR20090062963A, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=KR20090062963A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Park et al. 2019)

Park, J. O.; Cho, S. H.; Son, H. D. & Cho, I. J. (2019) "Apparatus for stacking fuel cell stack", Offenlegungsschrift KR20150059542A, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=KR20150059542A>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Peng et al. 2021)

Peng, L.; Wan, Y.; Qiu, D.; Yi, P. & Lai, X. (2021) Dimensional tolerance analysis of proton exchange membrane fuel cells with metallic bipolar plates, *Journal of Power Sources*, 481, S. 1-10, DOI: j.jpowsour.2020.228927

(Porstmann, Wannemacher & Richter 2019)

Porstmann, S.; Wannemacher, T. & Richter, T. (2019), Overcoming the Challenges for a Mass Manufacturing Machine for the Assembly of PEMFC Stacks, *Machines*, 2019, 7(4), S. 1-20, DOI: 10.3390/machines7040066

(Prass et al. 2021)

Prass, S.; Ghunham, M.; Deutsch, J.; Horinek, V.; Riede, N. & Zimmerer, K. (2021) "Method for manufacturing a membrane assembly for a fuel cell with catalyst free edge areas; membrane assembly and fuel cell with membrane assembly", Offenlegungsschrift US20210280885A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20210280885A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Pretzel et al. 2017)

Pretzel, L.; Zäller, C.; Deutsch, J.; Horinek, V.; Riede, N. & Zimmerer, K. (2017) "Verfahren zum Herstellen einer Membran-Elektroden-Anordnung für eine Brennstoffzelle", Offenlegungsschrift DE102015010422A1, erhältlich über: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102015010422A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Raatz et al. 2012)

Raatz, A.; Löchte, C.; Burisch, A.; Wrege, J. & Hesselbach, J. (2012),
Mikromontage in *Montage in der industriellen Produktion*, Hrsg. Lotter, B. &
Wiendahl, H.-P., Springer-Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-642-29060-2

(Rapaport et al. 2013)

Rapaport, P.; Blowers, A.; Leistra, J. & Lakshmanan, B. (2013) "Schnelles
MEA-Einfahren und Spannungswiedergewinnung", Offenlegungsschrift
DE102013101829A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102013101829A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Rashapov, Unno & Gostick 2015)

Rashapov, W. R.; Unno, J. & Gostick, J. T. (2015) "Characterization of PEMFC
Gas Diffusion Layer Porosity" Journal of The Electrochemical Society, 162, S.
F603-F612, DOI: 10.1149/2.0921506jes

(Ream 2007)

Ream, S. (2007) High-speed laser welding of fuel cell metals, *ICALEO 2007*,
29.10.-01.11.2007, Orlando, Vereinigte Staaten, S. 149-154, DOI:
10.2351/1.5061065

(Reiff-Stephan 2013)

Reiff-Stephan, J. (2013) Automatisierte Handhabung biegeschlaffer Materialien
– Wo setzt die Ingenieursaufgabe an? *TH Wildau Wissenschaftliche Beiträge*
2013, S.72-76, DOI: 10.15771/0949-8214_2013_1_13

(Reinz Dichtungs GmbH 2015)

Reinz Dichtungs GmbH (2015) "Metallische Bipolarplatte mit rückfedernder
Dichtungsanordnung und elektrochemisches System", Gebrauchsmusterschrift
DE202014004456U1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE202014004456U1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Reinz Dichtungs GmbH 2016)

Reinz Dichtungs GmbH (2016) "Separatorplatte für ein elektrochemisches
System", Gebrauchsmusterschrift DE202015104973U1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE202015104973U1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Rückert & Schuhmacher 2017)

Rückert, T. & Schuhmacher, D. (2017) Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen wenigstens eines Brennstoffzellenstapels, Patentschrift DE102016007706B4, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102016007706B4>, zuletzt abgerufen: 25.06.2023

(Saito et al. 2002)

Saito, K.; Hagiwara, A.; Okamoto, T. & Horiuchi, A. (2002) "Verfahren zur Herstellung eines Brennstoffzellenseparators, ein Brennstoffzellenseparator sowie eine Polymerelektrolytbrennstoffzelle", Offenlegungsschrift DE10123387A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE10123387A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Saito et al. 2004)

Saito, K.; Okamoto, T.; Hagiwara, A. & Horiuchi, A. (2004) "Method of producing fuel cell separator, fuel separator, and polymer electrolyte fuel cell", Offenlegungsschrift US20040146771A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20040146771A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Saito, Hagiwara & Tanno 2005)

Saito, K.; Hagiwara, A. & Tanno F. (2005) "Separator für Polymerelektrolytbrennstoffzelle und Verfahren zur Herstellung", Offenlegungsschrift der europäischen Patentschrift DE69922289T2, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE69922289T2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Schäfer & Fleischer 2021)

Schäfer, J. & Fleischer, J. (2021), Flexibles, stückzahlskalierbares Stapeln von Brennstoffzellen unter Berücksichtigung vorangelagerter taktgebender Prozesse, *Future Mobility*, Esslingen, 21.09.2021, Technische Akademie Esslingen, ISBN: 9783943563498

(Schäfer & Fleischer 2022)

Schäfer, J. & Fleischer, J. (2022), Optimized High Precision Stacking of Fuel Cell Components for Medium to Large Production Volumes in *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*, Hrsg. Schüppstuhl, T.; Tracht, K. & Raatz, A., Springer Nature Switzerland, Cham, S. 27-37, DOI: 10.1007/978-3-030-74032-0_3

(Schlatter 2017)

Schlatter, U. (2017) "Method and apparatus to manufacture metallic bipolar plates", Patentschrift US9630233B2, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US9630233B2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Schmid 2018)

Schmid, J. (2018) "Brennstoffzelle für einen Brennstoffzellenstapel und Brennstoffzellenstapel", Offenlegungsschrift DE102016223975A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102016223975A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Schneider 1999)

Schneider, R. (1999) Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formlabiler Bauteile, Dissertation, Forschungsberichte IWB, Band 122, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, München, ISBN: 3-89675-559-5

(Schuler Automation 2018)

Schuler Automation (2018) "Vorrichtung zur Herstellung von Bipolarplatten", Gebrauchsmusterschrift DE202016008510U1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE202016008510U1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Seliger et al. 2003)

Seliger, G.; Szimmat, F.; Niemeier, J. & Stephan, J. (2003), Automated Handling of Non-Rigid Parts, *CIRP Annals*, 52(1), S.21-24, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60521-6

(Shi, Weber & Kusoglu 2016)

Shi, S.; Weber, A. Z. & Kusoglu, A. (2016), Structure/property relationship of Nafion XL composite membranes, *Journal of Membrane Science*, 516, S. 123 – 134, DOI: 10.1016/j.memsci.2016.06.004

(Shin & Cho 2007)

Shin, H.S. & Cho, S.H. (2009) „Heiz-Drück-Spanneinrichtung für die Herstellung einer 5-Schicht-MEA“, Offenlegungsschrift DE102007061416A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102007061416A1>, zuletzt abgerufen: 25.06.2023

(Simon et al. 2015)

Simon, C.; Hasché, F.; Müller, D. & Gasteiger, H.A. (2015) Influence of the Gas Diffusion Layer Compression on the Oxygen Mass Transport in PEM Fuel Cells, *ECS Transactions*, 69 (17), S. 1293-1302, DOI: 10.1149/06917.1293ecst

(Sompalli et al. 2007)

Sompalli, B.; Litteer, B. A.; Gu, W. & Gasteiger, H. A. (2007) Membrane Degradation at Catalyst Layer Edges in PEMFC MEAs, *Journal of The Electrochemical Society*, 154, S. 1349-1357, DOI: 10.1149/1.2789791

(Speidel & Gaugler 2022)

Speidel, A. & Gaubler, B. (2022) "Separatorplatte mit homogenisierter Sickenkraft im Portbereich", Offenlegungsschrift DE102022203540A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE10202203540A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Stahl 2018)

Stahl, P. (2018) Edge Effects on the Single Cell Level of Polymer Electrolyte Fuel Cells, Dissertation, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, DOI: 10.18419/opus-9691

(Stahl et al. 2020)

Stahl, P.; Fing, O.; Dahl, K. & Kraft, J. (2020) "Baugruppe für eine elektrochemische Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen einer solchen Baugruppe", Offenlegungsschrift DE102018115994A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102018115994A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Stahl, Kraft & Götz 2016)

Stahl, P.; Kraft, J. & Götz, M. (2016) "Elektrochemische Einheit für einen Brennstoffzellenstapel", Offenlegungsschrift DE102015100740A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102015100740A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Straßer 2011)

Straßer, G. (2011) Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung, Forschungsberichte IWB, Band 256, Technische Universität München, Herbert Utz Verlag, München, ISBN: 978-3-8316-4161-1

(Ströbel et al. 2004)

Ströbel, R.; Quick, J.; Scherer, J.; Gaugler, B.; Schleier, C. & Grafl, D. (2004) „Kontaktplatte für Brennstoffzellen, Brennstoffzelle und Brennstoffzellenstapel sowie Verfahren zur Herstellung einer Kontaktplatte“, Patentschrift DE102004009869B4, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102004009869B4>, zuletzt abgerufen: 27.07.2023

(Suzuki & Kawasaki 2020)

Suzuki, A. & Kawasaki, K. (2020) "Rubber composition and a sealing material for fuel cell separators", Offenlegungsschrift US20200109259A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20200109259A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Takahashi et al. 2022)

Takahashi, T.; Takuya, I.; Murata, K.; Hotaka, O.; Hasegawa, S.; Tachikawa, Y.; Nishihara, M.; Matsuda, J.; Kitahara, T.; Lyth, S.M.; Hayashi, A. & Sasaki, K. (2022) Accelerated Durability Testing of Fuel Cell Stacks for Commercial Automotive Applications: A Case Study, *J. Electrochem. Soc.*, 169, DOI: 10.1149/1945-7111/ac662d

(Tang et al. 2008)

Tang, Y.; Kusoglu, A.; Karlsson, A. M.; Santare, M. H.; Cleghorn, S. & Johnson, W. B. (2008) Mechanical properties of a reinforced composite polymer electrolyte membrane and its simulated performance in PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, 175, S. 817-825, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.09.093

(Tanno 2008)

Tanno, F. (2008) "Bipolar plate for fuel cell", Offenlegungsschrift US20110045377A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20110045377A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Tillmetz 2021)

Tillmetz, W. (2021) Von Technologie-Demonstratoren zu Fahrzeugfritten in Kundenhand in Wasserstoff auf dem Weg zur Elektromobilität in *Hautnah erlebt: Die Basisinnovation Brennstoffzelle*, Tillmetz, W. & Martin, A. (Hrsg.) Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-34747-5

(Umeyama 1991)

Umeyama, S. (1991) Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13(4), DOI: 10.1109/34.88573

(Uchiyama, Kato & Yoshida 2012)

Uchiyama, T.; Kato, M. & Yoshida, T. (2012) Buckling deformation of polymer electrolyte membrane and membrane electrode assembly under humidity cycles, *Journal of Power Sources*, 206, S. 37-46, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.01.073

(Valentine, James & Lakshmanan 2009)

Valentine, S.; James, R. L. & Lakshmanan, B. (2009) "Manufacture of unitized electrode assembly for PEM fuel cells", Patentschrift US7569082B2, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US7569082B2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(VDI 1982)

VDI (Hrsg.) (1982) Konstruktionsmethodik; Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen, Beuth Verlag, Berlin

(VDI 1990)

VDI (Hrsg.) (1990), VDI Richtlinie 2860 Montage und Handhabungstechnik Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole, Beuth Verlag, Berlin

(VDI 1995)

VDI (Hrsg.) (1995), VDI Richtlinie 2740 Mechanische Einrichtungen in der Automatisierungstechnik Greifer für Handhabungsgeräte und Industrieroboter, Beuth Verlag, Berlin

(Volk 2022)

Volk, W. (2022) Herausforderungen bei der MEA Herstellung
Technologietransfer aus dem Bereich der Verpackungsmaschinen in
Brennstoffzellen – Einsatzgebiete, Designs und produktionstechnische
Herausforderungen in Fleischer, J.; Lanza, G. & Schulze, V. (Hrsg.)
Tagungsband der wbk-Herbsttagung 2022, Shaker Verlag, Düren. ISBN:
9783844087826

(Walter, Benkenstein & Stanik 2021)

Walter, A.; Benkenstein, J. & Stanik, H. (2021) "Verfahren zum Ausrichten von Dünnschichtelementen und Vorrichtung", Offenlegungsschrift DE102020202480A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE1020202480A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Watanabe 2018)

Watanabe, K. (2018) "Manufacturing method of fuel cell and gas separator for fuel cell", Patentschrift US10033060B2, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US10033060B2>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Weinmann 2022)

Weinmann, H.W. (2022), Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung, Dissertation, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), ser. Schriftenreihe des wbk Institut für Produktionstechnik, SHAKER Verlag, Düren, ISBN: 9783844087857

(Wind et al. 2002)

Wind, J.; Späh, R.; Kaiser, W. & Böhm, G. (2002), Metallic bipolar plates for PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, 105, S. 256-260, DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00950-8

(Yi et al. 2019)

Yi, P.; Li, H. Penn, L. Qiu, D. & Lai, X. (2019) "Method for improving conductivity and corrosion resistance of fuel cell bipolar plate carbide coating", Offenlegungsschrift WO2019174373A1 , erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=WO2019174373A1> , zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Yoon et al. 2013)

Yoon, B. C.; Ko, H. J.; Suh, J. D.; Kum & Y. B. (2013) "Stecker zum Messen der Zellspannung eines Brennstoffzellenstapels", Offenlegungsschrift DE102013208249A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=DE102013208249A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Yoshida et al. 2006)

Yoshida, T.; Harada, D.; Nakakuki, S. & Ikeda, M. (2006) "Fuel cell stacking method and fuel cell tracking device", Offenlegungsschrift US20060127732A1, erhältlich über:
<https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=pdf&docid=US20060127732A1>, zuletzt abgerufen: 03.01.2023

(Yuan et al. 2021)

Yuan, A.-Z.; Nayoze-Coynel, C.; Shaigan, N.; Fisher, D.; Zhao, N.; Zamel, N.; Gazdzicki, P.; Ulsh, M.; Friedrich, K.A.; Girard, F. & Groos, U. (2021) A review of functions, attributes, properties and measurements for the quality control of proton exchange membrane fuel cell components, *Journal of Power Sources*, 491, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229540

(Yumiya, Kizaki & Asai 2015)

Yumiya, H.; Kizaki, M. & Asai, H. (2015), "Toyota Fuel Cell System (TFCS)", *World Electric Vehicle Journal*, 7, *Electric Vehicle Symposium 28, 03.-06.05.2015, Korea*, S. 85 - 92

Anhang

Datengrundlage Abbildung 4-6, SCARA-, Knickarm- und Deltaroboter

Hersteller	Kategorie	Typ	Wiederholgenauigkeit [mm]	Traglast [kg]	Zykluszeit [s]	Quelle
Kuka	SCARA-Roboter	KR 12 R750 Z400	0.025	12	0.41	https://my.kuka.com
Kuka	SCARA-Roboter	KR 6 R500 Z200-2	0.02	6	0.36	https://my.kuka.com
Kuka	SCARA-Roboter	KR 6 R700 Z200-2	0.02	6	0.38	https://my.kuka.com
Kuka	SCARA-Roboter	KR 12 R650 Z400	0.025	12	0.4	https://my.kuka.com
Kuka	SCARA-Roboter	KR 12 R850 Z400	0.025	12	0.42	https://my.kuka.com
Kuka	Knickarmroboter	KR 10 R1100-2	0.02	10	0.42	https://my.kuka.com
Kuka	Knickarmroboter	KR 6 R700-2	0.02	6	0.43	https://my.kuka.com
Kuka	Knickarmroboter	KR 6 R900-2	0.02	6	0.4	https://my.kuka.com
Kuka	Knickarmroboter	KR 10 R900-2	0.02	10	0.43	https://my.kuka.com
Omron	SCARA-Roboter	R6YXGL250	0.01	5	0.49	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXGL350	0.01	5	0.49	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXGL500	0.01	5	0.59	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXGL600	0.01	5	0.63	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXGL500	0.01	10	0.45	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXG600	0.01	10	0.46	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXGH600	0.02	20	0.47	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXG700	0.02	20	0.42	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXG800	0.02	20	0.48	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXG900	0.02	20	0.49	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	SCARA-Roboter	R6YXG1000	0.02	20	0.49	https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/de/137e_x-series_scara_robots_datasheet_de.pdf?v=10
Omron	Delta-Roboter	CR_UGDS_XL	0.2	1	0.5	https://industrial.omron.de/de/products/x-delta-5
Omron	Delta-Roboter	CR_UGD5	0.2	1	0.48	https://industrial.omron.de/de/products/x-delta-5
Omron	Delta-Roboter	CR_UGDS_XS	0.2	1	0.4	https://industrial.omron.de/de/products/x-delta-5
Stäubli	SCARA-Roboter	TS2-40	0.01	0.25		https://www.staubli.com/content/dam/robotics/products/robots/ts2/TS2-range-robot-product-leaflet-DE.pdf
Stäubli	SCARA-Roboter	TS2-60	0.01	0.27		https://www.staubli.com/content/dam/robotics/products/robots/ts2/TS2-range-robot-product-leaflet-DE.pdf
Stäubli	SCARA-Roboter	TS2-80	0.015	0.3		https://www.staubli.com/content/dam/robotics/products/robots/ts2/TS2-range-robot-product-leaflet-DE.pdf
Stäubli	SCARA-Roboter	TS2-100	0.02	0.35		https://www.staubli.com/content/dam/robotics/products/robots/ts2/TS2-range-robot-product-leaflet-DE.pdf
Kuka	Delta-Roboter	KR 3 D1200	0.3	3	0.32	https://my.kuka.com
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-1/1130	0.01	0.1	0.3	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-1/1130	0.04	1	0.35	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-3/1130	0.01	0.1	0.4	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-3/1130	0.04	1	0.4	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-3/1130	0.1	3	0.52	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-8/1130	0.01	1	0.38	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-8/1130	0.04	8	0.6	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-1/800	0.07	1	0.38	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-6/1600	0.04	1	0.43	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Delta-Roboter	IRB 360-6/1600	0.01	6	0.6	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/deltaroboter/irb-360
ABB	Knickarmroboter	IRB 1090-3.5	0.05	3.5	0.76	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/knickarmroboter/irb-1090
ABB	Knickarmroboter	IRB 1100-4	0.01	4	0.42	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/knickarmroboter/irb-1100
ABB	Knickarmroboter	IRB 1200-7	0.02	7	0.4	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/knickarmroboter/irb-1200
ABB	Knickarmroboter	IRB 1200-5	0.025	5	0.41	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/knickarmroboter/irb-1200
ABB	Knickarmroboter	IRB 1300-7	0.03	7	0.43	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/knickarmroboter/irb-1300
ABB	Knickarmroboter	IRB 1300-10	0.023	10	0.43	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/knickarmroboter/irb-1300
ABB	Knickarmroboter	IRB 1300-11	0.02	11	0.37	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/knickarmroboter/irb-1300
ABB	Knickarmroboter	IRB 1300-12	0.05	12	0.38	https://new.abb.com/products/robotics/de/roboter/knickarmroboter/irb-1300

Datengrundlage Abbildung 4-6, Spindel-, Zahnriemen- und Lineardirektachsen

Hersteller	Beschleunigung [m/s ²]	Geschwindigkeit (max) [m/s]	Kategorie	Typ	Wiederhol- genauigkeit [mm]	Quelle
Weiss	40	4	Lineardirektachse	HL 50A	0.005	https://www.weiss-world.com/PDFs/de/Produktkatalog/HL%20Produktkatalog
Steinmeyer	16	0.79	Spindelachse	LA340-500-EDLM	0.0003	https://www.steinmeyer-mechatronik.de/positioniersysteme/standardsysteme/hochleistungs-linearachsen-xyz/la340-edlm/
Steinmeyer	25	1.21	Spindelachse	LA340-1000-EDLM	0.0003	https://www.steinmeyer-mechatronik.de/positioniersysteme/standardsysteme/hochleistungs-linearachsen-xyz/la340-edlm/
Steinmeyer	35	1.63	Spindelachse	LA340-1500-EDLM	0.0003	https://www.steinmeyer-mechatronik.de/positioniersysteme/standardsysteme/hochleistungs-linearachsen-xyz/la340-edlm/
Steinmeyer	40	2.06	Spindelachse	LA340-2000-EDLM	0.0003	https://www.steinmeyer-mechatronik.de/positioniersysteme/standardsysteme/hochleistungs-linearachsen-xyz/la340-edlm/
Steinmeyer	16	0.79	Spindelachse	LA110-500-EDLM-L	0.0004	https://www.steinmeyer-mechatronik.de/positioniersysteme/standardsysteme/hochleistungs-linearachsen-xyz/
Steinmeyer	20	1	Spindelachse	LA110-750-EDLM-L	0.0004	https://www.steinmeyer-mechatronik.de/positioniersysteme/standardsysteme/hochleistungs-linearachsen-xyz/
Rose+Krieger	20	10	Zahnriemenachse	RK MonoLine Z 120	0.05	https://www.rk-rose-rieger.com/fileadmin/catalogue/neuheiten/news_monomline_de.pdf
Festo	50	10	Zahnriemenachse	ELGA-TB-RF	0.08	https://www.festo.com/media/pim/198/D15000100122198.PDF
Festo	6	1.2	Zahnriemenachse	ELGS-TB-KF	0.08	https://www.festo.com/media/pim/283/D15000100144283.PDF
Festo	5	0.18	Spindelachse	ELGS-BS-KF	0.015	https://www.festo.com/media/pim/186/D15000100122186.PDF
Festo	8.5	1.2	Zahnriemenachse	ELGE-TB	0.1	https://www.festo.com/media/pim/280/D15000100144280.PDF
Parker	20	8	Zahnriemenachse	LCB 060	0.2	https://www.parker.com/parkerimages/euro_emd/EME/Literature_List/dokumentationen/190_510015_zahnriemenachsen.pdf
Rollon	50	5	Zahnriemenachse	ELM 65 SP	0.05	https://dimotion.de/wp-content/uploads/2020/03/Actuator-Line-DE-10-19-1.pdf
Rollon	10	6	Zahnriemenachse	SAB 120CX	0.2	https://dimotion.de/wp-content/uploads/2020/03/Actuator-Line-DE-10-19-1.pdf
Rollon	8	8	Zahnriemenachse	ZSY 180V	0.2	https://dimotion.de/wp-content/uploads/2020/03/Actuator-Line-DE-10-19-1.pdf
Rollon	50	4	Zahnriemenachse	E-SMART	0.05	https://dimotion.de/wp-content/uploads/2020/03/Actuator-Line-DE-10-19-1.pdf
Rollon	5	1	Spindelachse	TVS	0.005	https://dimotion.de/wp-content/uploads/2020/03/Actuator-Line-DE-10-19-1.pdf
Schunk	40	4	Lineardirektachse		0.01	https://schunk.com/de/de/automatisierungstechnik/linearmodule/dt/c/PGR_1620

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 selbstdiagnosztische Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

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

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

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

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

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

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigen 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 Produktions-
systeme unter Berücksichtigung von Unsicherheit**

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

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

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

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

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

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

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

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

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

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

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

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

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und 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 Stiebold

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 Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

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

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünfachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

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

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

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

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

**Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine
mitarbeiterorientierte Informationsversorgung**

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

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

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

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

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

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

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

**Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer
Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb**

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

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

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

**Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten
Fertigungsstrukturen**

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hüksam

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 Gönnheimer

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

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

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

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

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

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräspannprozesse 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 thermisch 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

Prozesskraftrichtungsangepasste Frästrategien 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 Führungswerzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und

Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des

Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

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

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für µMIM-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 Krauße

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

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

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

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

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobile Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

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

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer Einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

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

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

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

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

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

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicher-
heit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

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

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

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

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

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

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

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

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

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

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

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

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

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

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

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

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

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

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

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

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz

Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken

Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

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

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

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

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

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

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning

Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine 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

Kugelgewindetriebsspindeln

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 Gönnheimer

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